

المشروع القومي للترجمة

جامعة كل المعارف

إشراف : إيف ميشو

ما الكون ؟

الجزء الرابع

1017

المركز الفرنسي للثقافة و التعاون

جامعة كل المعارف

ما الكون ؟

(الجزء الرابع)

المشروع القومى للترجمة
إشراف: جابر عصفور

- العدد: ١٠١٧
- جامعة كل المعارف (الجزء الرابع)
  ما الكون؟
- إيف ميشو
- الطبعة الأولى ٢٠٠٦
- الغلاف إهداء من الفنان: فيليب آبلوا Philippe Apeloig

هذه ترجمة الجزء الرابع من موسوعة:
Université de tous les Savoirs
Sous la direction
d' Yves MICHAUD

الجزء الرابع بعنوان:
Qu'est-ce que l' Univers?
Volume 4

Éditions ODILE JACOB

تم نشر هذا الكتاب بالاشتراك مع المركز الفرنسى للثقافة والتعاون (قسم الترجمة) التابع لسفارة فرنسا بجمهورية مصر العربية فى إطار مشروع دعم النشر (طه حسين) التابع لوزارة الشئون الخارجية الفرنسية.

شارع الجبلاية بالأوبرا - الجزيرة - القاهرة ت: ٧٣٥٢٣٩٦ فاكس: ٧٣٥٨٠٨٤
EL Gabalaya st. Opera House, El Gezira, Cairo
TEL: 7352396 Fax: 7358084

المشروع القومى للترجمة

جامعة كل المعارف

ما الكون ؟

(الجزء الرابع)

إشراف

إيف ميشو





٢٠٠٦

بطاقة الفهرسة
إعداد الهيئة العامة لدار الكتب والوثائق القومية
إدارة الشئون الفنية

جامعة كل المعارف / إشراف : إيف ميشو - القاهرة : المجلس الأعلى للثقافة ، ٢٠٠٦

مج ٤ ، ٢٤ سم - (المشروع القومى للترجمة)

١ - الكون

(أ) إيف ، ميشو (مشرف) ٥٢٣,١٠

رقم الإيداع ٢٠٠٦/٢٤٦٣٤

الترقيم الدولى I.S.BN. 977 - 437 - 138 - 0

طبع بالهيئة العامة لشئون المطابع الأميرية

المحتويات

مقدمة

ترجمة: عزت عامر

إن هذه الأربعة وسبعين درسًا لجامعة كل المعارف المجمعة فى هذا الجزء تحت عنوان "ما الكون؟" تعالج على وجه الحصر علومًا مضبوطة، وهى الرياضيات، الفيزياء الفلكية، فيزياء الأرض، الفيزياء والكيمياء. وقد يكون من الادعاء أن نرغب فى بضع صفحات لاستخلاص دروس تلك المجموعة من المساهمات التى تعود إلى أشهر علمائنا. وسيكون لدى فلاسفة العلوم والاختصاصيين فى فلسفة العلوم الفرصة لعمل ذلك عندما سيطلعون على هذه النصوص التى تجعلنا على اتصال بالمعرفة وهى فى طريقها للإعداد وتجعلنا نواكب هذه الأبحاث، ومع ذلك تعتبر بعض الملاحظات مفيدة لفهم خطة هذا العمل وتوجهاته.

منهج المسار

كما سنلاحظ على الفور، حيث إن هذا ظاهر للعيان تمامًا، أنه ينقص هذه المجموعة علوم الحياة، وهى مسألة جيدة فى هذه الحالة بالنسبة للكون ولكن إذا كان كونًا بدون حياة. ويمكن دائمًا بالطبع البرهنة بمهارة على أنه أمر قليل الاحتمال. إنه قد كانت هناك حياة فى الكون خارج كوكبنا لكن ذلك قد يكون دفاعًا غير مقبول أيضًا إلى حد ما أكثر من كونه ضئيل الإقناع. وفى الواقع لا يتعلق الأمر هنا بمسألة الحياة لسبب بسيط هو أن الموضوع تمت معالجته ابتداء من الدروس الأولى لجامعة كل المعارف وأن المحاضرات المتعلقة بالحياة والحى تم نشرها فى الجزء الأول "ما الحياة؟" والجزء الثانى "ما الإنسانى؟".

ولو كان قد تم النظر لعلوم الحياة وفقًا للنظام الكلاسيكى للمعارف، لكانت قد وجدت مكانها فى القسم المخصص للكيمياء على هيئة تضمين بحثى مكرس بكامله لكيمياء الحياة (الكيمياء الحيوية). وكما شرحت فى مقدمتى الجزء الأول والثانى،

فإننى تخليت عن اتباع هذا النظام الذى قد لا يأخذ بعينى الاعتبار الزخم الاستثنائى لعلوم الحياة فى الوقت الراهن ولا حتى أهميتها الاجتماعية، والاقتصادية، والإنسانية ولا يحسب حسابًا وجوديًا إلى حد ما للقدرة الجديدة لهذه العلوم وقدرتها الاستثنائية. وبطريقة مماثلة بشكل كاف، تم النظر على حدة أيضًا إلى ما يتعلق بالمعلوماتية وعلم الاتصال، ولكن هذه المرة فى سلسلة دروس مكرسة للتكنولوجيات. وبالطريقة نفسها أيضًا، تمت إحالة معارف المواد، التى يمكن أن تُدرج على امتداد الفيزياء والكيمياء، والعلوم التطبيقية. وكل تلك المحاضرات ستظهر أيضًا فى الجزء الخامس "ما التكنولوجيا ؟".

وهذه المعالجة المستقلة لعلوم الحياة وإحالة عدد معين من الموضوعات المهمة تمامًا بالنسبة للمواد، والمعلوماتية، والاتصال إلى باب التكنولوجيات قد يوصفان بأنهما تفكير أولى، ويمكن بالطبع انتقاد هذين الاختيارين مع الأخذ فى الاعتبار نقص النسق الحاسم، ولكل نسق عيوبه كما أن كل "تصنيف للعلوم" يمكن وضعه موضع انتقاد أكثر أو أقل عمقًا. ومن جانبى، فإننى أردت بشكل خاص أن أجعل من الواضح عبر هذه الخيارات التحديد المزدوج المؤثر حاليًا على المعرفة والبحث العلمى، التحديد انطلاقًا من الرهانات الاجتماعية وعبء العوامل التكنولوجية.

وفى القرن السابع عشر، فى نص من الفصل العاشر من "ليفياثان" Leviathan، استطاع هوبيه Hobbes أن يستعرض الصلاحيات التى أمكن حتى ذلك الحين تقديرها مثل أن العلوم لا تؤسس صلاحية كبيرة كافية؛ لأنها ليست شائعة بما فيه الكفاية وليست سهلة المعرفة كما ينبغى، وليس هناك، حسب قوله، ما يكفى من البشر ذوى علم كافٍ للوصول إلى التحقق من العلم والتمييز بين الأنواع المختلفة من العلم الزائف (ويتضمن ذلك، بالتأكيد، السحر والشعوذة اللذين ينتشران دائمًا فى زمننا الحاضر). وأقر هوبيه تمامًا بأهمية وفعالية بعض المعارف التطبيقية مثل فن الاستحكامات وآلات الحرب، وبالطبع فإن فيلسوفنا لم يكن فى هذه المسائل أفضل خبيرًا فى زمنه (ظل مفهومه عن العلوم أكثر تعلقًا بالقرون

الوسطى أكثر من كونه معاصرًا)، لكن رأيه شهد أيضًا حالة تقلب، وانعزال ولم لا نقول هامشية العلم فى عصره، وهى حالة لم يكن عليها أن تبدأ حقًا فى التغير سوى مع إنشاء الجمعية الملكية Royal Society فى سبعينيات القرن السابع عشر. وبالنسبة إلينا بدت الأمور واضحة فى مظهر آخر، ولم تفرض الاحتياجات الاجتماعية (أو تلك التى نتصور، كل من جانبنا وبكفاءتنا المختلفة إلى حد بعيد، ما يجب أن تكون عليه) فقط جزئيًا توجهات البحث من خلال السياسيات العلمية وتمويلها، لكن التطبيقات التكنولوجية أظهرت أكثر من ذلك وجود تطبيقات تكتسح حياتنا اليومية؛ حيث تجلب فى الغالب بحثًا ينتهى فضلاً عن ذلك إلى تطبيق يكون له تأثير بالمقابل على المعارف الأساسية، وإنه لمن أجل توضيح ذلك التحديد المزدوج رأيتُ من الملاءم معالجة علوم الحياة مستقلة وعند افتتاح جامعة كل المعارف، ورأيت أيضًا أن أكرس للتكنولوجيات قسمًا خاصًا، بينما يقدم البعض بوضوح البحث الأساسى مثل ما تقدمه محاضرة بيير – جيل دو جين - Pierre Gilles de Gennes حول المواد الحيوية التكيُفية bio - mimetique، ومحاضرة أوليفييه ستيرن Olivier Stern عن التشفير المعلوماتى cryptographie informatique. وبالتأكيد كانت هناك استراتيجيات أخرى قابلة للتفكير فيها للوصول إلى النتيجة نفسها، ومثال لذلك بمزج الدروس الأساسية والدروس التقنية أو التكنولوجية، بطريقة تتيح ظهور هذا التداخل فى كل مجال. وإلى حد ما، هذا هو ما حاولت أيضًا عمله فى حالة الفيزياء الفلكية عندما كانت المسألة، لاعتبارات نظرية وتجريدية، متعلقة بطرائق الرصد، أو أيضًا عندما كان الأمر متعلقًا بفيزياء الجسيمات حيث تمت معالجتها ببرامج البحث وبالتجهيزات الضخمة، لكن تلك الاقتراحات لم تكن واضحة حتمًا بشكل كاف. ولو ذهبنا أبعد من ذلك لكان مسار العلوم مع ذلك قد أصبح مضطربًا بلا جدوى ولكان بشكل خاص قد امتد بإفراط، مع المجازفة بإرهاق الانتباه ومن ثم الإخلال، لأسباب أخرى، بالهدف الجارى بحثه.

وفى الواقع وأكثر من أى وقت مضى فإن الطلب الاجتماعى كما يظهر خلال سياسات العلم وطابع اختيارات الميزانية، يصوغ ويوجه البحث. وأكثر من

أى وقت مضى أيضًا تعتبر التطبيقات التقنية فى قلب البحث سيان على هيئة إسقاطات صناعية أو على هيئة دعم بالتجهيزات ووسائل التجربة، ونكتشف بطريقة نموذجية هذا التأثير المزدوج فى الوقت الراهن عن طريق التطور "الجينومى genomique" والتنافس الاقتصادى والتقنى الذى أطلقه، وليس فقط رهانات المجتمع وآفاق صناعة الصحة التى تلعب فى هذا الإطار دورًا حاسمًا، ولكن يجب ألا ننسى هنا مساهمة روبوتات تحليل شظايا الدنا ADN. وهذا ما يحدث بالمثل مع برامج التجهيزات الضخمة أو الخيارات بشأن الاستكشاف الفضائى. ولا ترتبط تلك البرامج الضخمة بالاختيار العلمى فقط ولكن أيضًا بالمنافع الاجتماعية وتقتضى موازنات بين الأنظمة العلمية، عندما لا يضاف إليها تأثيرات التوظيف والانعكاسات الاقتصادية المحلية. ومقابل ذلك، فإن القيود والنتائج يمكن أن تساهم كذلك بطريقة حاسمة فى تقدم هذا الفرع أو ذاك القسم من العلم وليس فرعًا أو قسمًا آخر.

يجب فورًا تقديم تباينات
لهذه الاستعدادات الضخمة اللافتة للنظر،

يجب فى الواقع أن نضع فى اعتبارنا هذا العامل الأساسى الذى ينشأ عنه جمود منظومات البحث والتعليم، وتتطور العلوم فى قلب منظومات اجتماعية مثلها مثل منظومات التعليم والبحث، وهى منظومات عامة ولكن ليس دائمًا أو ليس وحسب، مهما قل النظر إليها فى مجموعة بلدان وليس فرنسا فقط، وتنتج هذه المنظومات من جديد وتنقل وتنمى المعارف وتعد البدلاء لأجيال الباحثين، وهى تستخدم كثيرًا شيئًا آخر غير الموارد البشرية: تجهيزات وحتى تجهيزات بالغة الضخامة (تلسكوبات، معجلات، مواقع رصد واختبار) مثلما تستخدم برامج تمويل وتوظيف ذات مدى بعيد شاقة ومرتفعة التكاليف، مثل برامج استكشاف الفضاء. ويعنى ذلك أن السياسات العلمية لا يمكن أن تؤثر على التوجهات أكثر مما يتيحه

جمود منظومات التعليم والبحث هذه، ويعتبر هذا دون شك عقبة أمام المرونة الشهيرة التى تتمسك بها مجتمعاتنا "فائقة الحداثة hyper - modernes" - وليس بالضرورة أن يكون ذلك أمرًا سيئًا. وحالات الجمود المؤسسى، التى تكون ضارة إلى حد ما من نواحٍ، لها فى الواقع من جانب آخر مزية تمهيد أعمال التغيير بالغة السرعة وتجنب ردود فعل آلات تسجيل الزلازل (نتحدث فى الوقت الحالى بالأحرى عن "الطوارئ") عند المطلب الاجتماعى الذى يكون أحيانًا قصير النظر تمامًا. وتأتى كذلك اضطراريًا للنجدة افتتاحية لا غنى عنها عن مبدأ البحث العلمى فى الطوارئ وفى الفاعلية التى ليست منتجة مباشرة، وهو ما يعتبر حيويًا بالنسبة للبحث الأساسى. منْ كان يظن فى الستينيات أن ظاهرة اللازر لن تكون فقط فى التطبيقات التقنية التى حصلنا عليها منذ ذلك الحين ولكن فى الأهمية التى حملتها حتى فى صلب البحث الأساسى؟ ويمكن قول الشىء نفسه عن السيولة الفائقة superfluidite والموصلية الفائقة superaconductivite، أو عن ظاهرة النفق الكمية l`effet tunnel quantique.

وهناك تباين آخر يتعلق هذه المرة بالرؤية التى تتكون عن العلم ويجب أن تؤدى تلك الرؤية إلى تعديل وجهة نظرنا عن الجِدة.

يميل التصور الراهن، والذى يمكن تقريبًا وصفه بأنه ميثولوجى (أسطورى)، عن العلم إلى جعل العالِم مكتشفًا باستخدام ذكائه ونبوغه بطريقة شبه حصرية لإنجاز اكتشافاته. وليس ذلك خطأً كليًا. والحقيقة أن كل اكتشاف يرتكز بعد كل حساب على إنتاج أو إبداع تصورى، وحتى، فى حالة الاكتشافات بالغة الضخامة، على إبداع مجموعة تصورات تغير تمامًا نموذج المعرفة الذى يكون معمولاً به حتى ذلك الوقت، لذلك لم يكن مؤرخو العلم مخطئين عندما يشددون قبل كل شىء على اقتصاد التغيرات التصورية فى العلوم، غير أن الثمن الذى يجب تسديده فى هذه الحالة هو ما لا نميل إلى كشفه، أو نكشفه بشكل غير كافٍ، فعندما يتضمن الأمر البيئة التقنية والمادية للعمل، وتجهيز الاكتشاف، كما نوه جاستون باشلار Gaston Bachelard، فإن التصورات تتجسد فى الآلات، والأدوات، بل

وفى مواقع الرصد والاختبار. وهذا التجهيز، كما تظهره بوضوح زيارة إلـــى أى متحف للعلم، يكون دائمًا معقدًا للغاية، مرتفع التكاليف، وبشكل خاص، اســـتثنائيًا، وغير مألوف وبارعًا بالنسبة لزمنه إنه فى طليعة النبوغ التقنى، وتعتبـــر عمليـــات تبريد الذرات باللازر، والميكروسكوب الذى يعمل بظاهرة النفق، ومعجلات البحث فى الجسيمات، فى الوقت نفسه فى طليعة البحث التقنى والإبداعية الأكثر براعة - وتكلفتها مرتفعة جدًا - بدون ذكر بعثات الاستكشاف الفضائى، وأصـــبح البحـــث العلمى فى القرن العشرين أكثر إحساسًا أيضًا بأهمية هـــذه البيئـــة التكنولوجيـــة، وتسعى الكثير من محاضرات جامعة كل المعارف إلى العمـــل علـــى إدراك هـــذه الأهمية للتقنية والتركيبات التجريبية. وعلى مستوى سياق الدروس، حاولت أيـــضًا اقتراح برمجة بضع محاضرات أكثر "تقنية" فى صلب دورة محاضرات، ولكن قد تكون فى حاجة أيضًا إلى الإكثار منها وجعلها أفضل، وعلى أى حال، لن يحل أى شيء محل الزيارة المباشرة لبعض مختبرات أو مواقع البحث؛ لذلك لو كـــان هنـــا نقص فى هذه السلسلة مع كونها طويلة جدًا، فإن التوضيح المناسب لهـــذه القاعـــدة التكنولوجية للنشاط العلمى نوع من "درس" عن عالم الأجهزة والمختبرات.

ويجب إضافة رؤية من نوع آخر: وتتعلق بالتفسير الذى يتم غالبًا للمعقولية التقنية، ولقد أصبح شائعًا، خاصة فى التذييل والإطناب المبسط لفلـــسفة هابرمـــاس Habermas، الهبوط بالعلم إلى "منفعة فـــى المعالجـــة الأداتيـــة manipulation instrumentale" التى قد تكون مباشرة تقنية فى جوهرها، وهذا الإسقاط الـــساذج للتقنية على العلم لا يخدم بكل أسف لا العلم ولا التقنية. إنه يستغنى عن الاهتمـــام تمامًا بطبيعة التقنى المعاصر، التى لها من جانب آخر مصطلح التكنولوجيا، وهـــو الشائع عادة بذلك الذى ينقل الحذلقة، عن التسيير الآلى automatisation والإحالـــة إلى المعلوماتية الأكثر إقناعًا. ومن المؤسف ما نتابعه فى أغلـــب الأحيـــان لـــدى الفلاسفة وفلاسفة العلم عند التخوف من التقنية بمفاهيم آلات القرن التاســـع عـــشر والمعالجة الميكانيكية. وفى الوقت نفسه، فإن تمييز العلم بأنه "أداتى" يجعلـــه كتلـــة متراصة، وتبسيطه بشكل مهين وإخفاء تنوعه، كما أنه من المطلوب التطبيق التقنى مثله مثل المعرفة الأساسية الأكثر نظرية من جهة التأمل المتـــشابك. والحقيقـــة أن

المرء قد يصاب بالاضطراب عند التمييز بشكل أحادى المعنى بين العلم وفوائده، وهذا بالضبط أحد الدروس فى هذه المحاضرات الذى يوضح من جانبنا هذا التعدد فى التوجهات وتشابكها.

ما النقاط البارزة
لهذه المجموعة من المساهمات الآن ؟

السمة المشتركة والتنافسية للبحث

من خلال عمليات العودة إلى الوراء وإلقاء نظرة على التطور الحديث الذى نفتتح به الكثير من الدروس، نلاحظ بوضوح تام سمة مشتركة للعلم. والبحث العلمى، كما هو موجود فى الفيزياء، وفى الفيزياء الفلكية أو فى الرياضيات، هو عمل جماعة دولية، وليس هذا جديدًا، فقد كان هناك دائمًا جماعة قومية ثم دولية فى مجال العلم لكن هذه الجماعة هى من الآن فصاعدًا بالنسبة لنا عالمية وتعمل بإنتاجية ذات طبيعة صناعية.

وهذه الجماعة هى جماعة تعاونية ولكنها أيضًا تنافسية، ويُترجم التعاون بالبرامج الدولية فى البحث والتجهيزات والاستكشاف، وبالمنظومة الدولية للنشر ولمصداقية النشرات، وبتبادل العلماء وبعثات العلماء، والمؤتمرات الدولية، والمنح التنقلية المتاحة للباحثين الشباب أيضًا، وهو ما يجب معرفته جيدًا، بحركات الهجرة للجماعات العلمية، التى تضبط أو تصحح انحرافات (حالات نقص أو فائض) التوظيف المحلية، وحتى لو كان ذلك لا يؤيد نظرية اجتماعية عن الواقع، فإن علماء نظريات أى مدخل اجتماعى للمعرفة يجدون هنا جزئيًا تأييدًا لوجهة نظرهم.

وهذا التعاون، والذى يكون لكثير من الاعتبارات تضامنى إلى حد بعيد، لا يكون إطلاقًا سلميًا؛ حيث تكون الفِرق فى تنافس ضار عديم الشفقة من أجل الوسائل والمصادر؛ لجذب الباحثين ولتعريف الأوائل بما تقدموا فيه؛ وينتج عن ذلك تعجيل شديد للبحث، وتوسع فى النشرات والنتائج، وعولمة للنشاط ودورة المعلومات.

فلنترك جانبًا الاعتبارات الاجتماعية للنشاط العلمى لنهتم الآن بالواقع، لقد اعتاد "عامة البشر" تصور المغامرة الإنسانية فى إطار منظومة شمسية بهذا القدر من الاتساق فضلاً عن أنها مصنَّعة كساعة، وظل تصورنا الكونى نيوتونى فى مجمله، فلا يمكن أن يكون سكان الكواكب الأخرى، إذا حدث أن ظهروا، سوى "مريخيون"، وأن الحياة تعتمد على الشمس، وهذا التصور الذى قام على ثورة أولى يؤدى إلى "عالم مغلق على كون غير محدود" (ألكسندر كوير Alexandre Koyre). وشهد القرن العشرين حدوث ثورة ثانية من الطراز نفسه لكن بما لا يُقاس؛ حيث انفجر هذا الإطار لصالح مفهوم عن كون فى حالة تمدد فى زمكان النسبية العامة بمقدار ليس له علاقة بما نعتقد أن فى قدرتنا تصوره، ولم يحدث فقط أن هذا النموذج للكون الذى تصوره أينشتاين تعقد وتم إثراءه بداية من العشرينيات ليلتزم نظريًا فى آخر الأمر، لكنه "تجسم" أيضًا فى هذا الاتجاه حتى أنه، كما يمكن القول، اكتسب وضوحًا ومضمونًا خلال النصف الثانى من القرن العشرين، وخاصة مع تطور تقنيات علم الفلك الراديوى، وبفضل بعثات فضائية استكشافية ووضع وسائل رصد على المدار لم نصل إليها أبدًا من قبل، وما كان نموذجًا ذهنيًا أصبح حقيقة ملموسة، بما فى ذلك أن هذه الحقيقة الملموسة تمت "فى الحقيقة" بمساعدة النمذجة الرقمية. وبشكل مترابط فإن المستويات المكانية الزمانية لهذا الكون (١٥ مليار سنة...) وفترات التطور تصيب بالدوار، وبالمقارنة فإنها تصبح أكثر إثارة مما كان فى زمن باسكال Pascal أو نيوتن Newton من هشاشة ورقة حال الواقع الإنسانى، ولقد أضفت أيضًا على المعرفة طابع اللغز، ففى مكان ما فى جزء من هذا الكون المتمدد سعت كائنات جاهدة؛ لكى تنتج تصورات عن التطورات التى أتت بها. والمعقولية أو عدم المعقولية هنا يختلطان بطريقة تحدث اضطرابًا فى كل حالات اليقين، وأدت أيضًا إلى ظهور التساؤلات الفلسفية والدينية (لم أقل الاستجابات) التى كانت أيضًا باطلة أكثر من كونها مبررة، والعكس بالعكس.

والذى أبان عن نفسه، فضلاً عن ذلك، هو علم الفلك النسبى وكذلك الفيزياء والكيمياء الكميتين، وليس هناك ما يقال عن الرياضيات، إنه الطلاق (لكنه مؤسس جيدًا وواضح) بين تصوراتنا الإنسانية، الجديرة بحيوانات أكثر أو أقل غوصًا فى العالم الملموس، وبين هذه العلوم، بين أنماط تصوراتنا العلمية، الرياضية من الناحية الأساسية، والصور الراهنة التى نكونها عن العالم والأشياء فى تصرفاتنا فى اليومية. هذا الطلاق مؤسس جيدًا بمعنى أنه يمكننا عرض المراحل والانقطاعات التى تقودنا من عالم إلى آخر، وهو واضح بمفهوم أنه يمكننا أيضًا أن نضع كوننا إدراكيًا فى قلب أنماط تصوراتنا. ومحاضرات الرياضيات، خاصة تلك التى توضع لأهداف هندسية تعتبر نموذجية فى هذا الخصوص.

وهذا الانقطاع بين العالم الذى يُوصف تقليديًا بأنه ذلك المحسوس بداهة وعوالم التصورات العلمية ليس سوى حداثة استثنائية. ويمكن أن نتتبع منذ ميلاد العلم الحديث الجاليلى أو النيوتونى هذا التطور فى التجريد وفى النهاية انقطاع المعرفة العلمية عن المحسوس بداهة فى العالم الذى يسمى ظاهراتى phenomenal. وباستثناء أنه لم يبقَ منذ وقت طويل سوى حدس قد يدعو إلى الاعتقاد بوجود علاقة من ذلك النوع الذى اعتقد كانت Kant بإمكانية بقائها بين الإحساس والمعرفة العلمية، ويظل هناك، ما يقال عرضًا، وهو أكثر صعوبة أيضًا ألا وهو شائبة التعميم العلمى. فضلاً عن ذلك فإن محاضرات الرياضيات مثل تلك التى تتناول طبيعة الكون، وتلك الخاصة بالفيزياء أو الكيمياء الكمية ستوضح بإسهاب أن التصورات العلمية منفصلة تمامًا عن تصورات الخيال، وهى مُشمِّلة coextensives بحيث تشمل شكليات رياضية منقاة وبدون بديهيات وترتبط فى آخر الأمر بالتجربة من خلال أجهزة تقنية تكون هى نفسها من منتجات البنية العلمية. ولا يستتبع أى شىء بسبب ذلك سوى أن العلم يصف رؤيا أو يهتم بنفسه فى كون شكلى، وفى الغالب ليس لدينا مدخل ككائنات طبيعية سوى الأشكال، والقوى والمجالات والتى لا تشكل سوى جزء ضئيل من الحقيقة المدركة فى

ظروف مرتبطة بالحواس محدودة للغاية. نحن لا ندرك سوى جزء ضـــئيل مـــن الحقيقة وبالنسبة للباقى يجب أن نآزر ترميمات تكون، بسبب بعـــض الارتباطــــات بالحواس وبعض التقنيات، ذهنية بالنسبة لأغلب الآخرين؛ أى تصورية.

تكنولوجيات النانو

إذا قادتنا تصوراتنا عن الكون إلى فهم أنواع من الزمكان لا يكون هناك تبعًا لها ما يشبه كوننا، وإلى سياقات فيزيائية لا يمكن أن نفهمها بشكل بـــديهى، فعلـــى الطرف الآخر تسير بنا فيزياء السنوات الثلاثين الماضية نحو المصادرة والتصرف فى عالم كما وصفناه من قبل، لا يوجد إلا نادرًا، بالغ الصغر، مهيأ بحيث يكـــون هذا "الصغير إلى أقصى حد" قابلاً للقياس من الآن فصاعدًا ويمكن معالجته تقريبًـــا على مستوى النانومتر. ولا يمكن القول بأن لدينا هنا ثورة نظرية، فالنظرية الذرية والكمية ظلت على ما هى عليه قبل نزولنا نهائيًا إلى تلك المستويات، ونتج بالمقابل تحسن متصل فى التجهيزات وأنواع الحساب، ووسائل البحـــث وأجهـــزة الـــتحكم وتوجيه الظواهر التى فتحت مجالاً جديدًا للتدخلات البشرية، وهذا حقيقى بالنـــسبة للتعامل مع الذرات "واحدة واحدة"، لصناعة دوائر كهربائية، ولـــلإدراك الحـــسى بالأسطح والتركيبات النسيجية، بنتائج بـــدأت تظهـــر علـــى مـــستوى تطبيقـــات تكنولوجية، كما سوف نرى فى المحاضرات عن المواد المتوقع ظهورها فى الجزء الخامس من سلسلة المحاضرات هذه. ومنذ وقت طويل ظل علم المادة مجرد نسبيًا ونظرى؛ لأن نماذج المعقولية ظلت بصراحة مبسّطة (مثل تلك الخاصة بالفيزيـــاء الإحصائية للقرن التاسع عشر) وكانت الأجهزة بدائية، ومع تكنولوجيات النانو فإن هذا العلم أصبح يختص بمجال المعالجات العملية.

معرفة التعقد ومعرفة المصنع الحى

إذا كانت الاكتشافات النظرية الضخمة للقرن العشرين فـــى مجـــال علمـــى الكون والمادة قد تمت فى أغلبها قبل الثلاثينيات، فإن إسهام السنوات الراهنة يمكن

تمييزها انطلاقًا من ثلاثة جوانب: تعقد المدخل الرياضى، والمساعدة المعلوماتية للاستخدامات الرياضية، وتحسين تقنيات التجهيز والمعالجة. والذى أصبح بدوره ممكنًا هو شكل جديد من المعرفة، تلك المتعلقة بالظواهر المعقدة التى أفلتت حتى الآن من التنظير وبشكل خاص من بداية المعرفة بنشاط المصنع الحى، ولن أرجع هنا إلى التقدم الاستثنائى لكيمياء الحياة ولا إلى حل رموز الجينوم اللذين يشهدان بوفرة على أهمية المعرفة بالتعقد، وبالمساعدة الحاسمة التى قدمتها أجهزة الكمبيوتر لمعالجة تلك الكميات من المعطيات وتنظيمها والقدرات المدهشة للمعالجة على المستوى الصغير micro - manipulation لمواد الحياة. وهذا ما حدث أيضًا بالنسبة لفيزياء المادة اللينة، والركام والمادة المحببة، وبالنسبة لكيمياء مواد الغراء، وبالنسبة لمعرفة آليات التوصيل الكهربائى، ودائمًا كانت هذه المعرفة التى تتعامل مع "موضوعات جديدة" وسياقات معقدة تجند عمليات رياضية مبتكرة، وتقنيات رصد مستحدثة، وأنواع نمذجة معلوماتية حتى الآن مستحيلة، وفى كل الحالات أدى هذا المدخل إلى ظهور شىء ما أو مجال متعدد العناصر أو مستعرض بالنسبة للتخوم الكلاسيكية للمعرفة، مثلاً على حدود فيزياء المادة والكيمياء، والمعرفة بالحى والمعرفة بالمواد، وبالتدريج أصبحت المداخل عابرة للنظم وتكتشف مفاهيم جديدة فى هذا الانتقال نفسه.

النظرية الكمية وإثباتها

إذا كانت النظرية النسبية قد شهدت العديد من الإثباتات، فإن فيزياء الكم، التى نحتفل فى عام ٢٠٠٠ بمرور مائة سنة على اكتشافها، والتى تمثل قاعدة كل معارفنا الفيزيائية، قد انتظرت المزيد من الوقت لتتجاوز مرحلة تجارب التفكير والحسابات. وما يشير إليه الكثير من المحاضرات المكرسة هنا لهذا الموضوع، أنه لو كان تفسير هذه النظرية استمر موضوعًا للنقاشات النشيطة (التفسير الوضعى لمدرسة كوبنهاجن Copenhague فى مواجهة الاستفهامات حول حقيقة المفاهيم الكمية والطرائق المتنوعة للتوفيق بين النظرية ووجهات نظرنا حول الطبيعة)، لكان نشاط علماء الطبيعة قد تطور أيضًا من الآن فصاعدًا من حيث التجارب

والتعاملات التقنية، وأصبحت التجارب الافتراضية والأفكار قابلة للتحقق، مثال لذلك يمكن نصب فخ لفوتون أو ذرة، والتعامل معه بشبكة ليزر، للحصول على التفاعل الكمي، ويمكن للقائمين بالتجارب الآن أن يقولوا كلمتهم، ولهذا ليس من المؤكد أننا "نفهم" النظرية الكمية بقدر ابتعادها عن حدود علاقتنا التجريبية بالطبيعة، لكن النظرية فاعلة، ونفهم بشكل أفضل تناقضاتها (لاسيما عبر تعميق مفهوم اللاتماسك decoherence) والعلوم التى تستخدمها بشكل مستمر من الناحية النظرية والتقنية. لن أقول المزيد حول هذه النقطة حيث إنها موضحة أكثر من خلال دروس الاختصاصيين فى هذا الجزء.

الرياضيات

لا تطمح الخمس عشرة محاضرة المكرسة للرياضات (بما فيها محاضرة بيير كارتييه Pierre Cartier حول "الرياضيات والواقع" فى الجزء الأول وكذلك محاضرة جان – فيليب بوشو Jean - Philippe Bouchaud حول الاضطرابات المالية فى الجزء السادس) إلى تناول كل اتجاهات البحث لكنها تعطى فكرة عن تنوع تلك الاستكشافات وخصوبتها العجيبة. والشيء نفسه حول دراسة المجالات الجديدة (الكسوريات fractales، والفيزياء الكمية، والمكان النسبوى) حتى حل الحدسيات مثل حدس فيرمات Fermat مرورًا بالعمل المتعلق بالمجالات الجديدة (الاقتصاد الرياضى، وخوارزميات algorithmes ضغط المعطيات، والعُقد، وتقلبات البورصات أو الاضطرابات المناخية)، وانعكاس ذلك على الأساسيات والتعريفات، ونظرية البرهان demonstration، ولا ننسى التطورات المهمة فى المحاكاة الرقمية واستخدام الحساب المعلوماتى فى مساعدة أعمال عالم الرياضيات، وقد تكون جرأة من جانبى أن أفصح عن بعض الآراء العامة حول "طبيعة" الرياضيات فى الوقت الراهن؛ فلنقل فقط أن ابتكار المفاهيم فى هذا المجال أمر أساسى وأن علماء الرياضيات يَعدون بلا توقف نماذج يمكنها أن تجد تطبيقات مفاجئة إلى حد بعيد لكنها تثير بدورها مشكلات تصورية جديدة. وفى تجهيز برنامج

جامعة كل المعارف كتب إلىَّ عالم الرياضيات فلاديمير أرنولد Vladimir Arnold، الذى لم نستقبله للأسف لأسباب طارئة بأن علماء الرياضيات يعتبرون "فرعًا من العلم التجريبى حيث التجارب لا تكلف كثيرًا". وبالتأكيد لا تحل هذه الشهادة المثيرة المشكلات الميتافيزيقية لشروط تطبيقها على الواقع التجريبى بالغ التنوع لكنها تعطى فكرة طيبة بما فيه الكفاية عن الحالة الفكرية لعلماء الرياضيات حاليًا وعن قوة أدواتهم وصياغاتهم، التى تدين لها كل العلوم الأخرى حاليًا.

إيف ميشو Yves Michaud

١٥ ديسمبر ٢٠٠٠

الباب الأول

آفاق الرياضيات الحديثة

القواعد المخية في الحدس الرقمى[1]

بقلم: ستانيلاس ديهاين

Stanislas DEHAENNA

ترجمة: مها قابيل

يسحرنا عقل الرياضيين، ما الآليات التى تجعل نسيج الخلايا العصبية والمشتبكات (synapses) **ومجموعة الخلايا العصبية المعقدة الناقلة** Neurotransmetteurs تحول القهوة إلى نظريات؟ وما التمثلات العقلية وتكوينات الخلايا العصبية للمخ البشرى التى تجعله - وحده فقط - يستطيع أن يولج إلى الحقائق الرياضية؟ على مدى فترات متعاقبة يؤكد البعض نجاحهم فى العثور على الإجابة المتمثلة فى العقل الأسطورى لأحد أعظم علماء القرن العشرين وهو ألبرت أينشتاين Albert Einstein لقد أغروا أينشتاين فى حياته بإجراء مختلف أنواع التجارب التى أثارت التعليقات المرحة لرولان بارت Roland Barthes: "هناك صورة يبدو فيها ممددًا ورأسه ملىء بالأسلاك الكهربية؛ حيث يتم تسجيل موجات مخه، فى الوقت الذى يطلب منه أن يفكر فى النظرية النسبية." بذلك يكون المخ الثمين بعد فترة قد تم حفظه، وتصويره، وعنونته وتقطيعه، وفقده وإيجاده. سيخرج على فترات متقطعة من وعائه ليأتى بتجليات جديدة. فى عام ١٩٨٥ أحضرت ماريان دياموند Marian Diamond من جامعة كاليفورنيا فى بركلى، جزءًا مكثفًا من الخلايا المغذية cellules gliales التى تكون محيط الخلايا العصبية للقشرة الدماغية، من منطقة العظام الجدارية لجمجمة أينشتاين.

وفى عام ١٩٩٩ أكدت ساندرا ويتلسون Sandra Witelson، من جامعة ماك ماستر McMaster بأونتاريو، أنها شخصت بعد وفاة أينشتاين بأكثر من أربعين عامًا شذوذًا فى التشريح الدماغى لأينشتاين يرى بالعين المجردة؛ حيث

---

(١) نص المحاضرة رقم ١٦٧ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٥ يونيو ٢٠٠٠.

بدت فصوصه الجدارية منتفخة، وأخاديده ملتوية بعمق عن طريقهم الأصلى عما لو كانت منطقة القشرة كاملة، بحيث تغيب منطقة الغطاء الجدارى كلية. l'opercule pariétale

إنى أعد واحدًا من كثيرين، الذين يعتبرون هذه الأبحاث مضحكة وغير ناضجة، فهى تبحث عن جذور العبقرية فى بضع سنتيمترات مكعبة من القشرة المخية المتممة، وعلى الرغم من التقدم الظاهرى لعلوم الأعصاب المعرفية، فإنها ليست على استعداد لتحليل الجوهر العصبى للاختلافات الفردية بشكل دقيق يمكن من خلاله التمييز بين رجل حائز على جائزة نوبل وآخر فيزيائى ذى إمكانيات محدودة، على الجانب الآخر فمن حقهم تمامًا أن يبدأوا فى اكتشاف القاسم المشترك بين كل العقول المتمكنة من الرياضيات. ففى تحليل أخير، يؤكد جان بيير شانجيه Jean-Pierre Changeux فى حواره مع الرياضى المعاصر آلين كون[٢] Alain Connesأن "العناصر الرياضية تتماثل مع حالات فيزيائية لمخنا، بحيث يصبح فى استطاعتنا مبدئيًا أن نراقبها بطريقة خارجية بفضل طرائق تصوير المخ". بالفعل فإن الطرائق الحديثة فى العلوم المعرفية، والتصوير بالرنين المغنطيسى تسمح لنا اليوم بالوصول إلى التصور المخى للموضوعات الرياضية البسيطة جدًا التى تتقاسمها كل البشرية، وهى الأعداد الصحيحة.

إن بعض الرياضيين أثناء تركيزهم على تجريد الرياضيات الحديثة جدًا قد لا يجدون هنا سوى أعمالٍ ذات اهتمامات فرعية، لأشياء بسيطة لا تمثل سوى جزءٍ أو لا شيء من البحث الرياضى، وسننسى فى ذلك الوقت أن الأعداد تمثل حجر الأساس التى بدونها ما كان لصرح الرياضيات أن يعلو.

فقضية أسس الحساب تشغل موقع مركزى فى فلسفة الرياضيات، منذ أفلاطون Platon وديكارت Descartes حتى برتراند رسل Bertrand Russell

---

(٢) Connes (A.) Changeux (J.-P), Matière à pensée, Odile Jacob, 1989 "Poches Odile Jacob", 2000.

أو دافيد هيلبرت David Hilbert. وتقترح أبحاثنا أن يجد أحد أصول علم الحساب، وهو الحدس فى مفهوم العدد، جذوره فى البناء المخى، ويمثل هذا الأخير تلقائيًا وحقيقيًا منذ الميلاد، هذا البارامتر الأساسى لعالم الفيزياء.

الأسس المخية للحدس الرقمى

كيف نحيط بالحدس الرقمى فى المعمل؟ لنأخذ مثالاً بسيطًا: جمع الأعداد الصغيرة، هل مجموع 43+39=51 صحيح؟ إن نظرة خاطفة تكفى للإجابة بالنفى دونما الحاجة لعمل حساب، فنحن نعرف أن النتيجة المقترحة تبدو خاطئة؛ لأننا نستخدم تلقائيًا استعارة مكانية: إن النتيجة المفترضة 51 "بعيدة" جدًا، ممكن أن نقول "فى أقصى اليسار". تتم هذه العملية العقلية القائمة على التقريب والمقارنة خارج إدراكنا. نحن نعلم أن الناتج صغير جدًا، ولكننا لا ندرى مطلقًا كيف نعرف إننا نعرف. هكذا نصف فى عدة جمل هذا الحدس الرياضى الذى نملكه جميعًا. إنه عبارة عن خريطة مكانية أو "خط عددى" نضع عليه عقليًا الكميات والتى تتيح لنا أن نعلم كيف نستدل بشكل فورى على علاقات التقريب بين الأعداد، بحيث إننا نعلم فورًا، ولكن بشكل غير دقيق، أى مكان يشغل عدد ما بالنسبة للأعداد الأخرى.

إن بساطة هذا المعنى للعدد خادعة بالفعل على الرغم من صغرها المتناهى لأن حدسنا للعدد يشترك مع استنتاج الرياضيين الكبار فى صفتين على الأقل أساسيتين. أولاً، إن المستويات العليا من التفكير الرياضى تتم عادة دون دعم من اللغة. فيؤكد أينشتاين "أن الكلمات واللغة، مكتوبة أو منطوقة لا تلعب أدنى دور فى آليات تفكيرى". كذلك الحدس الرياضى لا يستدعى الكلمات ولا حتى مساحات القشرة الدماغية للغة، ولكن يعتمد على مناطق فى القشرة المخية الجدارية مرتبطة باستيعاب المكان.

ثانيًا: إن الاكتشاف الرياضى يعتمد على آليات غير واعية. وما يدعو للصدمة" كما يقول بوانكاريه Poincaré، "هو مظاهر الإضاءة المفاجئة، وهى

علامات تظهر نتيجة عمل طويل غير واعي، دور هذا العمل غير الـواعى فـي الاكتشاف الرياضى يبدو لى غير قابل للنقاش". فيما يخص الحدس العـددى، هـذا الاستنتاج المتكرر للرياضيين يمكن أن يؤكد بشدة عن طريق مناهج علـم الـنفس التجريبى التى تؤكد وجود حسابات غير واعية subliminaux.

إن الصفة غير اللغوية للحدس العددى تظهر بوضوح عند الأشخاص الـذين يتحدثون لغتين، فيجب على ذلك تمييز الحساب الدقيق لحدس الكميـات بوضـوح؛ حيث إنه يتأثر بدوائر اللغة. فكل من يتقن لغة ثانية يمكنه أن يجرب ذلك حتى بعد مرور سنوات، فمن الصعب جدًا عمل حسابات عقلية فى لغة أخرى غير اللغة التى تعلمنا بها الرياضيات. لى زميل إيطالى الجنسية أصبح يتقن تمامًـا اللغتـين بعـد مكوثه عشرين عامًا فى الولايات المتحدة، فهو يكتب ويتحدث الإنجليزية بتركيبات دقيقة مستخدمًا مفردات لغوية فياضة، ومع ذلك عندما يـضطر لعمـل حـسابات صغيرة نسمعه يرطن بإيطاليته الأصلية بعض الأرقام، ولا يتمكن أبدًا من الحساب بسهولة باللغة الإنجليزية. توضح لنا هذه النادرة إلى أى مدى الـذاكرة الرياضـية "الدقيقة" تعتمد على اللغة، ولكن ماذا عن خاصية التقارب الحدسى؟

فى دراسة سلوكية أجرتها إليزابيث سبيلك Elizabeth Spelke، فى معهـد ماساشوسـت للتكنولوجيـا Masschusetts Institute of Technologu، علـى أشخاص يتحدثون بطلاقة الروسية والإنجليزية، ويتم تدريبهم فى إحدى لغتيهم على حل مجموعة من مسائل الجمع. كانت بعض المسائل تتطلب إجابة دقيقة لا يمكـن أن تعتمد على الحدس وحده، بينما البعض الآخر لا يتطلب سوى تقييم الأكبر فـي الترتيب. وبعد التمرين فى لغة معينة، يتم اختبار قدراتهم على حل المسائل نفـسها فى اللغة الأخرى. وبعد عدة جلسات، تمكن المشاركون من إعطاء إجابات أسـرع للمسائل التى كانت تتطلب إجابات دقيقة عنـدما تطـرح علـيهم الأسـئلة باللغـة المستخدمة إبان التدريب عنها فى اللغة الأخرى. مما يؤكد أن هذه المعارف الدقيقة يتم تخزينها فى المخ فى شكل لغوى مختص بلغة معينة. ومع ذلك تسلك المـسائل

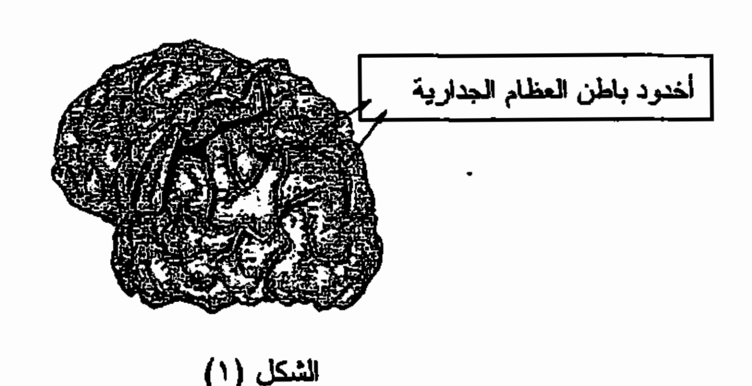
التقريبية بشكل مختلف وكان الأداء متساوى فى اللغتين. فعندما نسجل فى الذاكرة أن 47+50، تساوى حوالى المائة، الإجابة فى لغة أخرى لا تشكل أية صعوبة إضافية.

إن معلوماتنا إذن عن الكميات التقريبية تكون مخزنة بشكل مستقل عن اللغة. هناك على الأقل اثنان من الدوائر المخية للحساب العقلى: الدائرة الشفهية، التى تسمح بتشفير الأعداد على شكل كلمات، وتخزن الجداول فى شكل جمل تحفظ عن ظهر قلب فى لغة ما، ودائرة غير شفهية؛ حيث تمثل الكميات فى شكل مكانى وتسمح بالتقريب.

وبفضل التصوير الوظيفى بالرنين المغناطيسى (IRM) للخدمات الطبية لمستشفى فريدريك – جوليو Frederic-Joliot بأورساى Orsay، استطعنا أن نبصر أو نتخيل مباشرة أى المناطق من القشرة المخية تشارك فى هاتين الدائرتين. يسمح الـ IRM برؤية بداية دخول الدوائر المخية فى نشاط معرفى. فكل تنشيط لمجموعة خلايا عصبية تصاحبها بالفعل زيادة موضعية فى منسوب الدم فى الشرايين التى تحيط بهذه المنطقة. تأتى هذه الزيادة لتعويض الاستهلاك الحاد فى الأوكسجين والجلوكوز فى النسيج العصبى. يفسد تدفق الدم من الخواص المغناطيسية المحلية للأنسجة المختبرة ويغير بشكل قابل للقياس إشارة الرنين المغناطيسى، وهذا يعكس بشكل غير مباشر حالة النشاط لجموع الخلايا العصبية للنسيج.

أثناء قياس الـ IRM، طلبنا من مجموعة طلاب حل مسائل التقريب بالتناوب مثلاً (2+1) يكون الناتج حوالى 4 أم 9 ؟ ومسائل أخرى تتطلب حساب دقيق (2+1) يكون الناتج 3 أم 5، على الرغم من أن الطلاب موضع الاختبار تعرضوا لمسائل الجمع نفسها فى الحالتين، فإن النتائج أظهرت أن تبنى استراتيجية التقريب أو الحساب الدقيق يصاحبها تعديلات جذرية فى نشاط المخ. فالحساب الدقيق ينشط شبكة جانبية فى نصف الكرة الأيسر ويستلزم مساحات مرتبطة بالمعالجة اللغوية ذات المستوى العالى (المنطقة السفلى من القشرة الدماغية

الأمامية اليسرى والتلفيف الزاوى (gyrus angulaire). أثناء عملية التقريب، على العكس، كان النشاط ذو جانبين ومتكافئ في كل من نصفي الكرة الدماغية، وكان مركزه فى الأخدود فى باطن العظام الجدارية للجمجمة le sillon intrapariétal، وهى منطقة تقع خارج مساحات اللغة ومرتبطة بتداول الأشياء في الفراغ (شكل ١). تلعب هذه المنطقة المخية دورًا حاسمًا فى الحدس العددى، إنها تنشط مجرد أن نلتزم بالتفكير فى كميات مدرجة فى مسألة حسابية. مفهوم أنها ليست وديعة لمجموع معارفنا الرياضية، فهى ليست "نتوء رياضى" بالمعنى الذى قصده المعتقدون فى فراسة الدماغ فى القرن التاسع عشر. تساهم المنطقة الجدارية فى وظيفة محدودة ولكنها حاسمة، فهى مدرجة فى قلب شبكة ممتدة وموزعة، وعلى ارتباط وثيق بالمساحات المرتبطة بمعالجة الكلمات والأرقام، وهذه الوظيفة هى وضع الأرقام فى فراغ الكميات.



الشكل (١)

تحديد منطقة الأخدود الجدارى؛ حيث نلاحظ نشاط مخى شديد أثناء الحساب العقلى ومعالجة الكميات، ونرى هنا فقط نصف الكرة الأيسر مرئى من الثلاث أرباع الخلفية.

التنشيطات الدماغية والقراءة غير الواعية

لقد توصلنا مؤخرًا، أنا وليونيل نقاش Lionel Naccache؛ لإثبات أن المنطقة الجدارية يمكن أن تحل الحسابات، دون أدنى إدراك منا، مؤكدين بذلك على فروض بوانكاريه Poincaré وهادامارد Hadamard. يبنى الحدس الرياضى فى مجال الأعداد، على الأقل، على إمكانية العمل اللاواعى المكثف.

إن تجربتنا بسيطة، لقد وضعنا متطوعًا أمام شاشة الحاسب وأخبرناه أنه ستظهر فى مركز الشاشة أولاً علامة مكونة من حروف عشوائية ثم عدد، وهذا الرقم يمكن كتابته بالأحرف "ستة" أو بالأرقام "6"، والشخص محل الاختبار لديه زران واحد فى يده اليمنى والثانى فى يده اليسرى، وأعلمناه بضغط الزر الأيمن بأسرع ما يمكن إذا كان العدد أكبر من خمسة، وضغط الزر الأيسر بأسرع مما يمكن إذا كان أقل من خمسة. وهذه الأزرار متصلة بحاسب يقيس لأقرب مللى ثانية الزمن الذى يمر ما بين ظهور الرقم على الشاشة والرد الدفعى للشخص.

هذا كل ما على المتطوع أن يفعله بوعى... لكننا لم نقل له كل شيء، فدون علم منه كل عدد يظهر كهدف يسبقه عدد آخر غير مرئى بالمرة، والذى سنطلق عليه اسم العدد "الطعم".كيف جعلنا هذا العدد غير مرئى؟ إننا نستخدم طريقة لعمل قناع بصرى تعتمد على أن تسبق كلمة "طعم"، والتى نريد أن نمحيها من الوعى، متسلسلات من الحروف بلا معنى مثل XHJGKS أو PLMZTA وكذلك نتبعها بمثل هذه المتسلسلات، عندما تعرض هذه الحروف فى المكان نفسه بالتحديد الذى تظهر فيه الكلمة "الطعم"، ويكون زمن عرض هذه الأخيرة لا يتعدى واحدًا على مائة من الثانية، فإن الشخص محل الاختبار لا يدرك سوى وميض للحروف غير المقروءة. ولا يستطيع فك شفرة الكلمة ذات القناع، ولا حتى أن يدرك وجودها.

وعلى الرغم من أن كل الأشخاص موضع الاختبار نفوا بشدة رؤيتهم لأى عدد فى اللحظات التى سبقت الهدف، فهل هذا يكفى لتأكيد غياب كل الوعى؟ كما أشار الفيلسوف الأمريكى دانيال دينيت Daniel Dennett، فإنه من المستحيل

معرفة إذا كان الشخص الذى ينفى وعيه بمعلومة أنه فعلاً لم يلتقط فحواهـا، أو إذا كان لم يعد يتذكر أنه أدركها على وجه السرعة. ومع ذلك يمكننا فى كل مـرة أن نحدد، وبشكل موضوعى، إلى أى مدى العدد ذى القناع بعيد المنال عن المعالجـة الواعية.لقد حشدنا مجموعة أخرى من المتطوعين اختبرنا لديهم القدرة على لمـح الأعداد "الطعم "فى ظروف مشددة، وجلبنا لهؤلاء المتطوعين كل التفاصـيل عـن طبيعة الأعداد "الطعم" المستخدمة فى تجربتنا، وقلنا لهم كذلك أن يركزوا انتبـاههم على هذا العدد بعينه، ويتجاهلوا تمامًا العدد الثانى. هل يمكن لهم فى هذه الظروف أن يحصدوا عن وعى بعض المعلومات عن "الطعم"؟ الإجابة كانت غير واضحة. حسب مدة العرض المستخدمة فى تجربتنا، لم يتوصل المتطوعون المدربون إلـى معرفة إنْ كان هناك طعم أم لا (كانوا بالفعل يجيبون بصورة دائمة أنـه لا يوجـد طعم). وكانوا أقل قدرة على تحديد ما إذا كان الطعم عددًا أو سلسلة من الحـروف العشوائية. وفى كلا الحالين، فإن قدرتهم على الاكتشاف، والتى تم قياسها بنظريـة اكتشاف الإشارات فى الضوضاء كانت منعدمة.

إن عمق المعالجة لمثل هذه المؤثرات **غير الواعية** stimilu subliminaux فى المخ البشرى كانت دائمًا موضوع جدال عنيف فى علم النفس. فيؤكـد بعـض علماء النفس أن كلمة **غير الواعية** يمكن أن تحلل عرضيًا على مـستوى الـشكل البصرى لحروفها، ولكن ليس بالطبع على مستوى معناها. لقد أظهرت معطياتنـا بوضوح أن شكوكهم غير مبررة. كما أثبتت العديد من النتائج أن العدد "الطعـم"، حتى وإن كان غير مرئى بالمرة، فإنه من الممكن مقارنته بلا وعى بعدد آخر، مما يستلزم أن معناه – أوالكم الذى يمثله – قد تم تحليله. أولاً فإن إجابات الأشـخاص محل الاختبار تزداد سرعتها عندما يمثل الرقم غير المرئى كمية قريبة من العـدد الذى يتعين عليهم تمييزه بوعى؛ لذلك من الأسهل التمييز بوعى أن "٦" أكبر مـن "٥" عندما يكون هذا العرض مسبوقًا بالرقم **غير الواعى** "٩" (الذى يعتبر أيـضًا أكبر من "٥") عنه حينما يكون مسبوقًا بالرقم "١" (الذى هو أقل من "٥"). فـى النهاية هذا التسهيل يصبح مهمًا جدًّا عند تكرار الكمية نفسها فى العـدد "الطعـم"

والعدد "الهدف". إن "رؤية" العدد"٤"، دون وعى، لعدة أجزاء من المائة من الثانية قبل رؤيته مرة أخرى بوعى، يعجل بشكل كبير من سرعة معالجتنا للمعلومة العددية .

بشكل حاسم، فإن تغيير طريقة الترقيم لا يؤثر مطلقًا فى المعالجة غير الواعية subliminal للكميات. وحتى حينما يقدم كل من العدد "الهدف "و العدد "الطعم" فى ترقيمات مختلفة (مثال الطُعم "أربعة"، والهدف"٤") يلاحظ هنا درجة التسهيل نفسها. وهكذا فإن التأثير غير الواعى يمارس على مستوى المعالجة الدلالية للمعلومات والتى لا تعتمد على الترقيم المستخدم.

هل يتعلق الأمر إذن بالتمثيل المكانى للكميات؟ بفضل الـ IRM استطعنا أن نتخيل مباشرة المساحات المخية التى تجتازها المعلومة غير الواعية، وإظهار ما يستتبع ذلك فى القشرة الجدارية. إن التكرار الـ غير الواعى subliminal للعدد نفسه يؤدى إلى التعود على تنشيط الدماغ فى المناطق الجدارية التى تحكم المعنى التقريبى للكميات. كما أن تأثير العدد غير المرئى يمتد فيما وراء ذلك، فإن مناطق الدفع التى تنشط عندما نستعد للقيام بحركة باليد، تدل على تهيؤ تنشيطى يقود إليه "الطعم".إذا كان على سبيل المثال العدد غير المرئى أقل من "5" بينما العدد التالى له أكبر، سنرى تنشيطًا سريعًا جدًا لمساحة التحكم فى اليد اليسرى، ثم التقويم لهذا التنشيط فى اتجاه اليد اليمنى. المقصود هنا البرهان الأول لإثبات أن المنشط غير الواعى يمكنه أن يعبر المخ من جهة إلى أخرى، بدءًا من المساحات البصرية وحتى العرض الدلالى والدوائر الدافعة circuits moteurs، دون أن يدرك الشخص موضع الاختبار .

ماذا نستنتج من هذه التجارب؟ إن المعالجة غير الواعية subliminal للكلمات هى موضوع جدال قديم فى مجال العلوم المعرفية ولا يكفى بالطبع بعض النتائج الحديثة لإقناع المتشككون. ومع ذلك فإن تجربتنا تحمل الماء إلى طاحونة هؤلاء الذين يؤكدون منذ زمن، مثل عالم النفس الإنجليزى أنثونى مارسيل

Anthony Marcel، أن المخ يستعيد بشكل غير واعٍ معنى الكلمات. يشير تناولنا إلى أن سلسلة مركبة من الحواس الدافعة sensori-motrice، والتى تؤدى إلى عمليات رياضية، يمكن أن تنفذ دون وعى، وتكمن خصوصية تجاربنا فى إثبات أنه حتى فيما يتعلق بالأوامر العشوائية مثل اضغط فى اليمين إذا رأيت رقم أكبر من ٥ – يمكنها أن تنفذ كاملة دون أن يصاحبها إحساس بالتحكم الواعى. ما حدود المعالجة اللاواعية فى المخ؟ هل هناك عمليات لا يمكن حسابها إلا فى إطار التحكم الواعى؟ وهل هذه الوظائف يمكنها أن تفسر الميزة التطورية التى أتى بها طوفان الوعى لدى الإنسان الأول؟ Les primates supèrieurs et l' homo sapiens.

إن اكتشاف هذه الأسئلة يمكن أن يؤكد أو ينفى استنتاجات الرياضيين التى تفيد أنه حتى العمليات الأكثر تعقيدًا مثل: برهنة نظرية جبر يمكن تنفيذها فى غياب الوعى.

فقدان الحدس العددى

إن الحدس العددى محفور بعمق فى أعماق الأخاديد الجدارية، وهو حاضر بشكل لاواعى وراء أصغر الحسابات التى نجريها حتى أننا لا نعى أهميته. إننا نعى دون أدنى جهد أن "3" أصغر من "5"، ويبدو بديهيًا جدًا أن "2" و "2" تساوى "4" حتى أننا لا نسأل أبدًا عن الآلة المخية المتسببة فى هذا الحدس. وعلى العكس لا ندرك أهميتها إلا حينما تتدهور.

يعلم علماء المخ والأعصاب منذ ثمانين عامًا أن أى تلف دماغى فى المنطقة الجدارية، فى سن النضج كما فى الطفولة الصغيرة، يمكن أن يؤدى إلى عجز كلى عن فهم ما تعنيه الأعداد، وفى بعض الحالات يكون العجز شاملاً بحيث تصبح قراءة وكتابة الأرقام مستحيلة، وتصبح هذه العناصر فارغة من معناها لدرجة أن المريض يكون عاجزًا عن استخدامها أدنى استخدام ، بينما يحتفظ بعض المرضى بقدرات جيدة على قراءة وكتابة الأعداد، أو على تسميع جدول الضرب عن ظهر

قلب، ومع ذلك فإنهم حتى وإن تذكروا كلمات مثل "ثلاث فى تسع تساوى سبع وعشرون" فإنهم لا يفقهون المعنى.

فى مستشفى بيتييه سالبتريير Pitié-Salpêtrière، قمنا أنا والبروفسور لورون كوهين Laurent Cohen بفحص رجل فى الستين من العمر تعرض لحادث مؤسف أصاب أوعية المنطقة الجدارية اليمنى بالمخ، وكان يعانى صعوبة فى مسألة الطرح حتى أننا أوقفنا الاختبار بعدما فشل فى حساب ٣ - ١ (وأجاب ٧). لم تكن هذه الصعوبات مرتبطة بنوعية عرض معينة؛ حيث إنه يقع فى الكثير من الأخطاء، سواء كانت المسائل تعرض عليه مكتوبة أو شفاهية، سواء كان عليه الرد بصوت عالٍ أو كان يكتفى فقط باختياره من ضمن مجموعة إجابات.

وكان يفشل أيضا فى اختبارات المقارنة، مميزاً "٦" كعدد أصغر من "٥"، وفى اختبار التنصيف bissection، فقد ميز بشكل طبيعى أن العدد الذى يقع بين "٢" و "٤" هو "٦" " لأننا نقول 2,4,6 " لقد كان يفهم مطلبنا بما أنه استطاع أن يجيب عن سؤال أى يوم يقع بين الثلاثاء والخميس وأى حرف يقع بين B,D. فقط إن مجال الأعداد على ما يبدو قد أصابه التلف.

نحن نرصد اليوم عدة ملاحظات مشابهة لدى مرضى من كل الأعمار وكل البلدان، كلها تشير إلى أن الخلل فى المنطقة الجدارية يصاحبه اضطرابات شديدة فى الحدس العددى، بما فيها على ما يبدو صغار الأطفال. إن عدم القدرة على الحساب فى أثناء النمو La dyscalculie du développement هو اضطراب حسابى يمكن مقارنته بالديسلكسيا Dislexie فى أنها تصيب نسبة كبيرة من الأطفال (بين 3% إلى 6% وفقاً للاستطلاعات الرأى النادرة المتاحة حول الأمراض المنتشرة épidémiologique) يعانى بعض هؤلاء الأطفال من عيوب منعزلة فى الحساب، ويمكن مقارنته بما يصيب الشخص الناضج بعد تعرضه لحادث فى أوعية المخ. لقد درس زميلىَّ الإنجليز براين باتروورث Brian Butterworth ولويزا جيرلى Luisa Girelli حالة شاب ناضج يسمى شارل ينعم

بذكاء عادى، وقد عانى دائمًا من صعوبات شديدة فى التعامل مع الأعداد. حصل شارل على درجة الماجستير فى علم النفس ويتحكم فى اللغة بمهارة، وحظى بتعليم عادى مضافًا إليه دروس خاصة فى الرياضيات، ومع ذلك فهو يحسب على أصابعه للقيام بأى عملية حسابية تافهة. وتظهر الاختبارات النفسية على الأقل عيبين رئيسين، أولاً: أن شارل لا يملك أى إدراك سريع للعدد، وأنه غير قادر على تحديد كم الأشياء الموجودة أمامه، حتى وإن لم يكن هناك سوى شيئين أو ثلاثة، إذا لم نترك له الوقت الكافى للعد، ثانيًا لديه عيب فى الحدس الخاص بحجم الأعداد. إننا نستغرق عادة وقت أقل لمقارنة عددين تفصل بينهما مسافة كبيرة، ويرجع هذا بلا شك إلى أن الأعداد البعيدة عن بعضها بوضوح تكون أسهل فى إيجاد موضعها عقليًا فى فراغ الكميات، ولكن تصبح فكرة المسافة معكوسة عند شارل، فهو يلزمه وقت "أكثر" كلما كانت الأعداد متباعدة أكثر؛ لأنه عليه أن يعد ليدرك أن ٩ أكبر من ٢.

لم يخضع شارل لأى اختبار تصوير للمخ، ورغم ذلك فقد ظهرت حالة أخرى من الاضطراب الرياضى عند النمو تم اختبارها باستخدام علم الأطياف عن طريق الرنين المغناطيسى، أظهرت شذوذًا بؤرى فى الإنجاع métabolisme تمامًا فى المكان الذى نفترض أن الدوائر العصبية المسئولة عن فهم الكميات تقع فيه. فى المنطقة الجدارية السفلى للمخ، يبدو أنه فيما قبل الولادة، كانت الهجرة العصبية للخلايا العصبية للقشرة الجدارية غير طبيعية، فبعض الأمراض الوراثية، بالإضافة إلى بعض العوامل الأخرى مثل: الولادة المبكرة، أو التعرض للكحوليات أثناء فترة حمل الأم، يبدو أنها تدعم الاضطراب الوظيفى المبكر للمخ وتزيد من شدة الصعوبة فى الحساب dyscalculie.

حدس وتربية رياضية

إن صعوبة الحساب فى النمو، أكثر من أى معطى آخر تجريبى، تضع المخ فى قلب المنافسة الرياضية. لقد تخيلنا أننا سنجد فى الرياضيات بناءً فكريًا مبنيًا على

اختراع الرموز، والقوانين الشكلية، أوعلى لغة عالمية لوصف بناء الكون، ولكن هذا البناء وهذه اللغة لا يأخذا معناهما لأن مخنا مزود، منذ الميلاد، بدوائر عصبية جديرة باستيعاب البناء الحدسى للمجال الذى سيكون للرياضيات. إذا كانت المستويات العليا للرياضيات تبنى بفضل اللغة والتربية، فإن أساساتها الأولية - مفهوم العدد، وأيضًا المكان، والزمن، والعملية... - يجب البحث عنها فى ترتيب مخنا نفسه.

تؤكد الأبحاث فى علوم الأعصاب المعرفية للرياضيات بشكل صارخ تركيب العمليات المخية modularité، فالمخ ليس عضوًا موحد الخواص isotrope يمتص مثل الإسفنجة ثقافة بيئته، ولكنه بالأحرى أشبه بتجمع من الأعضاء، كل منها مجهز مسبقًا لإعداد الطفل النامى على إيجاد نقط معرفية مرجعية فى بيئته. إن المدرسة سواء فى الرياضة أو فى مجالات أخرى لا يمكن أن تبنى إلا على هذه الحواس الأساسية المحفورة فى دوائر مخنا أثناء التطور والنمو. فى حالة تدخل مرض "مخ وأعصاب" على إحدى هذه التجهيزات،فى مجال المعرفة، يمكن للحساب أن يتهدده خطر الذبول أو الاختفاء.

إن إعادة وضع المخ وتمثلاته المركبة فى أسس تعليم الرياضيات لا يلزمنا بالرجوع إلى شكل من التقليص الساذج، فلا ينبغى نفى وجود تمثلات مخية ثابتة للمواد الرياضية، أو رفض تأثير الثقافة والتربية على حالاته العصبية؛ إذ إن حالات النشاط التى نراها عن طريق تصوير المخ عند الشخص الناضج هى نتيجة القيود المتبادلة للتعلم والتكوين الأساسى لشبكات المخ. إن التأكيد على دور القيود البيولوجية لا يتضمن أى تثبيت أو سلبية تجاه المعوقين، كما أن قصر النظر يعالج بوضع النظارات، لا يوجد ما يمنع التفكير فى دراسة متأنية للشبكات العصبية (للذين يعانون من صعوبات فى الحساب) حيث إنها تؤدى إلى تطوير استراتيجيات التعليم أو إعادة التعليم المحسن لهؤلاء الأطفال. ولكن على الأقل نجنب التلاميذ - ولنكرر مرة أخرى ذوى الذكاء العادى فى مجالات متعددة - أن يوصموا بالكسل والبلادة أو يصبحوا محبطين فى متابعة دراستهم.

على العكس فإن وجود قاعدة بيولوجية عامة لمعنى الأعداد لا يستلزم أبدًا أن تظهر هذه الأخيرة تغيرات شاذة عند المتفوقين رياضيًا. إذا كان هناك عجز أساسي في الحدس العددي، فلا يوجد حاليًا ما يشير إلى أن في مجموع الناس العاديين قد يولد بعضهم مزودين "بحدبة رياضية" أكبر، بل على العكس يقترح الجميع أن الحدس العددي يعتبر جزءًا من التراث الجيني للكل، ولكنه قابل للازدهار بدرجات مختلفة تبعًا للعمل والميول التي نقدميا له. فاستطلاعات الرأي الدولية تظهر أن استراتيجيات التعليم الأوروبي والأمريكي أو الآسيوي كان لها أثر جذري في معدل نجاح الطلبة الذين خضعوا للاختبارات نفسها، كما تشير سيرة كبار الرياضيين إلى أن هؤلاء عملوا وفكروا يوميًا بشكل مكثف، غالبًا منذ سن مبكرة جدًا، قبل أن يروا مواهبهم تزدهر وتتفتح. قد يكون الرياضي الموهوب هو ذلك الذي يعرف أفضل من الآخرين، أن يستغل أحداسه المتعددة التي يسقطها عقلنا على العالم.

المراجع:

- Dehaene (S.), *La Bosse des maths*, Paris, Odile Jacob, 1997.
- Butterworth (B.), *The Mathematical Brain*, London, Macmillan, 1999.
- Dehaene (S.), Spelke (E.), Stanescu (R.), Pinel (P.) et Tsivkin (S.), « Sources of mathematical thinking : Behavioral and brain-imaging evidence », *Science*, n° 284, p. 970-974, 1999.
- Dehaene (S.), Naccache (L.), Le Clec'h (G.), Koechlin (E.), Mueller (M.), Dehaene-Lambertz (G.), van de Moortele (P. F.) et Le Bihan (D.), « Imaging unconscious semantic priming », *Nature*, n° 395, p. 597-600, 1998.
- Levy (L.-M.), Reis (I.-L.) et Grafman (J.), « Metabolic abnormalities detected by H-MRS in dyscalculia and dysgraphia », *Neurology*, n° 53, p. 639-641, 1999.
- Witelson (S.-F.), Kigar (D.-L.) et Harvey (T.), « The exceptional brain of Albert Einstein », *Lancet*, n° 353 (9170), p. 2149-53, 1999.

لغز نظرية فيرمات[٣]

بقلم: إيف هيليجوارش
Yves HELLEGOUARCH

ترجمة: مها قابيل

لقد ظلت لوقت كبير "النظرية الأخيرة لفيرمات" بمثابة "لغـز" للرياضـيين بالمعنى الذى أعطاه لها طوماس كون فى عمله "بنية الثورات العلمية". المقـصود هنا الزعم الذى قاوم الإثبات لمدة ٣٥٠ عامًا من الجهود المتواصلة من قبل عدد لا يحصى من الرياضيين، ربما كانت بقية ادعاءات الرياضى التولـوزى قـد أمكـن البرهنة عليها بدرجات متفاوتة من السهولة بمساعدة العلم "الطبيعـى"، فـإن هـذا الزعم أصبح أسطوريًا تحت اسم "النظرية الأخيرة لفيرمات".

فى السبعينيات، بتأثير إحباط الـ ٣٥٠ سنة من الفشل النسبى، انتشر القـول بأن فرض فيرمات لا أهمية له؛ لأنه إما غير قابل للبرهنة أو أنه خطأ، ولكن فـى ظرف ثلاثين عامًا غيَّر المجتمع الرياضى وعيه جذريًا للمسألة بمروره من حالـة عدم الاهتمام تقريبًا إلى حماس كبير. فجأة بدأ الرياضيون فى الاعتقاد فى حقيقـة هذه الفرضية حوالى سنة ١٩٨٥م، وقد أصبحت هذه الفرضية العقلية مثيـرًا قويًـا لبناء النظريات الصعبة التى أدت إلى برهنتها.

إن الزمن المتاح لن يسمح لى بالتعرض لمغـزى النجـاح الـشعبى لهـذه الأسطورة، ولا لتلخيص ٣٥٠ عامًا من الجهود التى لم تكلل بنجاح، وسأحد نفـسى ببعض الكلمات عن طبيعة المشكلة وعن الخطوط العريضة فى استراتيجية إثباتهـا قبل أن أختم، ومن الطبيعى أنى لن أدخل هنا فى تفاصيل عمل شديد التقنية.

---

(٣) نص المحاضرة رقم ١٦٨ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٦ يونيو ٢٠٠٠.

طبيعة المشكلة

إن صفحة حساب ديوفونط Diophante التى كان يدرسها فيرمات عندما كتب ملحوظاته الشهيرة كانت تقترح تقسيم مربع معطى لمجموع مربعين، مثلاً تقسيم ٢٥ إلى ٩ زائد ١٦، ما لاحظه فيرمات أنه من غير الممكن عمل ذلك مع أسس نونية كبيرة عندما $n \geq 3$. وبعد ذلك بوقت برهن فى حالة $n=4$ وأكد أنه لديه برهان فى حالة $n=3$ (وهى حالة ليست سهلة).

إن طبيعة هذه المسالة كانت غريبة بالنسبة لمعاصرى فيرمات الذين كانوا أكثر ألفة مع الكميات منهم مع الأعداد، حيث تفهم كلمة أعداد على أنها أعداد صحيحة موجبة فقط. وبالفعل إن فرضية فيرمات تكون خاطئة إذا اهتممنا فقط بالكميات الكبيرة (أو كما نسميها اليوم بالأعداد الحقيقية) وخطأ أيضًا فى حالة نظم أخرى من الأعداد مناظرة للأعداد الحقيقة، وتسمى (p-adiques) وترمز الـ p للعدد الأولى.

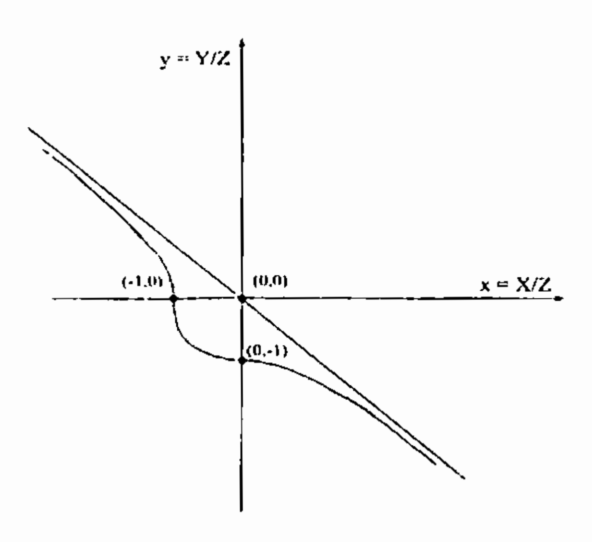
إن لم تكن هذه هى الحالة لأصبحت المسألة سهلة البرهان، وستكون "محليًا تافهة"، كما نقول فى هذه الأيام. إذا كان فيرمات كتب مثلاً عن المعادلة "$a^n+2b^n=4c^n$" إنها مستحيلة فى حالة الأعداد الصحيحة الموجبة عندما $n \geq 3$ لكان ذلك سهل برهنته؛ لأن هذه المعادلة ليس لها حلول من الدرجة الثانية 2-adiques وغير تافهة، ولكن كان يحلو لـ فيرمات تعذيب مراسليه؛ لذا لم يكن يهتم بغير المسائل الصعبة، وبالفعل فإن الفرضية صعبة؛ لأنها لا يمكن إثباتها بعدد منتهى من الاعتبارات المحلية، ولكن نقول إنها مسألة "كلية".

ورغم أن فيرمات تقاسم مع ديكارت Descartes شرف إنشاء الهندسة التحليلية، لا يمكننا الجزم أنه تصور المسألة على أسس هندسية، ولكن عندما تكون n فردية فإن فرضيته تقول إن المنحنى الإسقاطى للمعادلة:

$$X^n+Y^n+Z^n=0 \qquad (F_n)$$

ليس له غير ثلاثة حلول نسبية عندما $n \geq 3$ وهى نقاط الإحداثيات المتجانسة [(صفر،١،-١)، (-١، صفر،١)، (١،-١، صفر)]، ونقول إن هذه النقط المزعجة الثلاث هي النقط التافهة للمنحنى F_n وهى مسئولة جزئيا عن صعوبة المسألة؛ لأنها موجودة بالفعل.

وهنا تمثيل إفينى للمنحنى (F_n) حيث n فردية $n \geq 3$ في الشكل (١)



شكل (١)

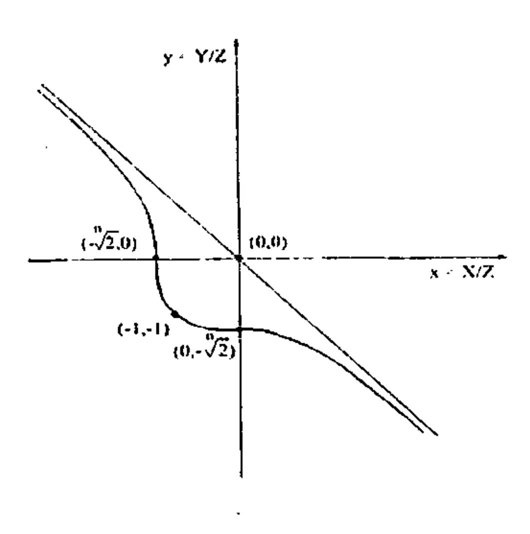
منحنى فيرمات Fn حيث n عدد فردى $n \geq 3$

فلننهى هذا الجزء بملحوظة وهى أن فرضية فيرمات ليست سوى نقطة مياه فى محيط الفرضيات المتشابهة والتى يصعب برهنة الكثير منها، ومن بينها مثلاً فرضية قريبة الشبه جدًا من فرضية فيرمات وهى فرضية دينيس Denes، الذى يؤكد أنه إذا كانت $n \geq 3$ وإذا كان مجموع اثنان من القوى النونية ضعف قوة نونية أخرى فإن كل هذه القوى متساوية، إن هذه الفرضية تعنى أن عندما n عدد فردى يكون منحنى دينس

$$x^n+y^n+2z^n=0 \qquad (D_n)$$

المعادلة ليس لها سوى نقطتين نسبيتين هما (.،-١،١)، (١،-١،-١).

وهذا تمثيل دقيق لمنحنى D_n حيث إن n عدد فردى ≥ ٣ (الشكل ٢) :



(شكل٢)

منحنى دينس Dn لـــn عدد فردى ≥ ٣

استراتيجية برهان ويلز

أصل التناول الجديد للنظرية يعود غالبًا لنهاية الستينيات، (ليس بعد ١٩٦٩ على كل حال) ويأتى من مسألة نظرية المنحنيات الناقصية[٤] المعرفة على الأعداد النسبية التى كانت فى ذلك الوقت مازالت مفتوحة (فرضية بيبوليفى Beppo-Levi المسماة بالفرضية الفلكلورية) والتى أصبحت نظرية بارى- مازير Barry-Mazur فى ١٩٧٧.

إن المنحنى الناقصى المعرف على Q (مجموعة الأعداد النسبية)، يمكن تمثيله بمكعب مستوى ثلاثى الأبعاد (أى منحنى من الدرجة الثالثة) ذى معاملات

(٤) الخاصة بالقطوع الناقصة. (المترجمة)

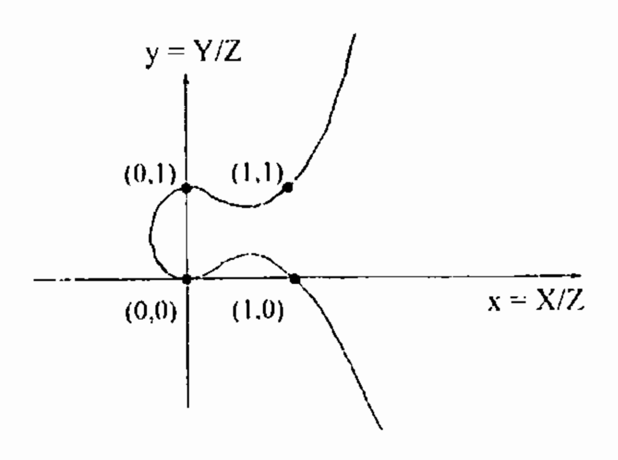
نسبية، له على الأقل نقطة نسبية ($x^3+2y^3+4z^3=0$) ليس منحنى ناقصى معرفًا على $\mathbb{Q}$ وليس له نقط مضاعفة ($y^2 z-x^3 =0$) ليس منحنى ناقصى).

وبفضل نقاطه التافهة فإن (F_3) منحنى ناقصى معرف على $\mathbb{Q}$ وهنا واحد آخر:

$$Y^2 Z - YZ^2 = X^3 - X^2 Z \quad (E)$$

يسمى هذا المنحنى بمنحنى ويل (تكريمًا للرياضى أندريه ويل André Weil) لأنه مرتبط ارتباطًا وثيقا بالمتسلسلة (شكل ٣)

$$F(q) = q \prod_{n=1}^{\infty} (1-q^n)^2(1-q^{11n})^2 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n q_n$$



شكل (٣)

مثال لمنحنى ويل Weil

نفرض أن عدد النقاط لاختزال المنحنى المختصر (E) فى الحقل المنتهى F_l ($l \neq 11$) يساوى $A_l - l+1$ فإذا وضعنا $q=e^{2i\pi z}$ حيث z عدد مركب الجزء التخيلى منه موجب، سندرك أن الدالة التحليلية $F(e^{2i\pi z}) \longrightarrow z$ لها خواص

ثبات قوية جدًا بالنسبة لزمرة من زمر التحركات لنصف المستوى المركب العلوى لهندسة بوانكاريه (للزمرة Γ_0 (11)).

يقال إن

$F(e^{2i\pi z})$ "صيغة قياسية مكافئة معيرة forme modulaire parabolique normalisée وزنها 2 للزمرة Γ_0 (11)" ولكن ربما تودون أن تعرفوا ما عناصر الزمرة $\Gamma_0(11)$؟

إنها التحركات

$$z \longrightarrow \frac{az+b}{cz+d} \quad \text{حيث} \quad a,b,c,d \in \mathbb{Z} \ \ ad-bc = 1$$

c تقبل القسمة على ١١.

إن فرضية شيمورا – تانياما – ويل (باختصار STW) Shimura-Tanyama-Weil الذى وضعها تانياما فى ١٩٥٨ تقول إن كل منحنى ناقصى معرف على $\mathbb{Q}$ يأتى من صيغة قياسية مشابهة لـ $F(e^{2i\pi z})$.

منذ فترة طويلة نستطيع تعريف الجمع على نقط مركبة فى منحنى قطع ناقص E معرف على $\mathbb{Q}$. نختار كصفر ω لهذا الجمع أحد النقاط النسبية من E، ونتحايل لنجعل كل ثلاثة نقاط على استقامة واحدة لها مجموع ثابت. إن فئة النقط المركبة من E وتسمى $E(\mathbb{C})$ تصبح زمرة إبدالية abelien group لهذا الجمع، والفئة الجزئية للنقط النسبية من E والتى تسمى $E(\mathbb{Q})$ تعتبر زمرة جزئية لها. إذا كان p عدد أولى تستطيع قسمة الصفر ω للزمرة $E(\mathbb{Q})$ على P ونجد P^2 نقاط M من $E(\mathbb{Q})$ بحيث M مضافًا إلى نفسه p مرة، يعطينا ω.

تكون هذه النقاط زمرة جزئية من $E(\mathbb{C})$ والتى تسمى زمرة النقط ذات الـ p– قسمة من E وتسمى E[p]

وهذه الزمرة تُشاكل (isomdrphe) حاصل زمرتين دوريتين من رتبة p، وهى إذن مستوى اتجاهى على الحقل المنتهى F_p.

بالوصول إلى هذه المرحلة يلزمنا تعريف السياج الجبرى المغلـق للأعـداد القياسية $\mathbb{Q}$ فى حقل الأعداد المركبة $\mathbb{C}$؛ لأن هذا أحد العناصـر الأساسـية فـى النظرية. لذلك فإن الزمرة $\mathrm{Aut}\,(\mathbb{C})$ للتشاكلات الذاتيـة automorphism لحقـل الأعداد المركبة: هى مجموعة تباديل $\mathbb{C}$ الحافظة للجمع والضرب فى $\mathbb{C}$، وعـدد هذه التشاكلات لانهائى.

ويسمى العدد المركب z جبرى إذا كان له عدد منتهى من الصور عن كـل عناصر $\mathrm{Aut}\,(\mathbb{C})$. لإعطاء أمثلة نتحقق بسهولة من أن $i = \sqrt{-1}$ أو $\sqrt[3]{2}$ أعـداد جبرية، ولكن نظرية مشهورة تقول لنا إن π ليس عددًا جبريًا؛ كى يكـون عـددًا مركبًا جبريًا يجب ويكفى أن يكون جذرًا لكثيرة الحدود polynome غير صـفرية ذات معاملات نسبية، وأثبت لندمان Lindemann ١٨٨٢ أن العدد π ليس له هـذه الخاصية.

ولما كانت التشاكلات الذاتية لـ $\overline{\mathbb{C}}$ تحتفظ بالاستقامة على الصيغة التكعيبية E المعرفة على $\mathbb{Q}$ فإنها تستحث تشاكلات ذاتية من الزمرة E[p]، وبما أن هـذه زمرة منتهية، نستنتج أن كل النقط E[p] لها إحداثيات جبرية. إن مجموعة الأعداد الجبرية من $\mathbb{C}$ مغلقة بالنسبة للجمع والضرب، فهى إذن حقل جزئى من $\mathbb{C}$ والذى يسمى حقل الأعداد الجبرية ويرمز له بالرمز $\overline{\mathbb{Q}}$. وزمرة التشاكلات الذاتيـة لهـذا الحقل تسمى "زمرة جالواه المطلقـة" « Groupe de Galois absolu $G\mathbb{Q}$» هـذه الزمرة اللانهائية تعتبر أحد الأبطال الأساسيين للحكاية؛ لأنها تسمح بتمييز النـسبية لعدد جبرى: العدد الجبرى ثابت تحت تأثير كل التشاكلات الذاتية على $\overline{\mathbb{Q}}$ يكـون نسبيى (العكس بديهى). إن فعل تأثير زمرة جالواه المطلقة Galois absolu علـى E[p] تسمح بمعرفة إذا كان E[p] له نقط نسبية: النقطة النسبية فى E[p] هى التى لا تتحرك تحت هذا التأثير. فكرة هذا التأثير، هو تمثيل جالواه (وبلغة أكثر تقنيـة نقول أيضًا إن الأمر يتعلق بتمثيل خطى مستمر لـ $G_{\mathbb{Q}}$ من الدرجة الثانية علـى الحقل F_p).

فـــى عـــام ١٩٦٩ فـــى مجلـــة أيـــام بـــوردوه الرياضـــية **Journées Arithmétique de** Bordeaux، اقترحت مناظرة للحل البدائى (a,b,c) للمعادلـــة (F_p) حيث P عدد أولى ≤ 5، بصيغة تكعيبية معرفة على الأعداد النسبية تكـــون معادلتها:

$$y^2 = x(x-a^p)(x+b^p)\ (\Gamma_{a,b,c})$$

ودراسة النقط ذات p تقسيم p-division الموجودة بها.

لم أقل لكم بعد معنى "حل بدائى" للمعادلة (F_p)، إنه ببـــساطة حـــل (a,b,c) حيث a,b,c لا يكون بينهم قواسم مشتركة.

فى كتابة المعادلة $\Gamma_{a,b,c}$ لا يظهر العدد c، بالفعل إنه مختبئ وتغيير مناسب فى أصل نظام الإحداثيات السينية يظهـــر أن المنحنيـــات $\Gamma_{a,b,c}$, $\Gamma_{b,c,a}$, $\Gamma_{c,a,b}$ هى نفسها.

هذا البناء فى الحقيقة يعطى اثنين من المنحنيات $\Gamma_{a,b,c}$ و $\Gamma_{b,c,a}$، ثم بعد ذلك بوقت كبير سمى أجمل هذه المنحنيات بمنحنى فراى Frey.تسمح هذه الـــصيغ التكعيبية بإعطاء معنى رياضى للتمييز بين الحلول التافهة والحلول غير التافهة لـــ (F_p) بما أنها لن تكون منحنيات ناقصية إلا إذا كان الحل (a,b,c) غير تافة.

إن المنحنيات الناقصية الافتراضية مهمة بـــالأخص فـــى تمثـــيلات زمـــرة الجالواة المطلقة، التى نحصل عليها من نقاط ذات الـــ p- تقسيم، هـــذه التمثـــيلات تعطى صورة مرتبة لزمرة جالواه المتوحشة المطلقة، بحيث إن منحنياتنـــا (مثـــل توأمة رولاند Roland) أجمل من أن توجد ولكن كيف نراها؟

هكذا كان السؤال فى ١٩٦٩؛ لاستحالة وجود حلول بدائيـــة غيـــر تافهـــة لمعادلة فيرمات فقد استبدلناها باستحالة وجود المنحنيات $E_{a,b,c}$ أى أننـــا حركنـــا المشكلة ببساطة ولكن بتحويلها بشكل جوهرى. إن نقطة هجوم ممكنة هى القول إن هذه المنحنيات تتناقض مع الفروض التى طرحها جـــى- بـــى ســـير J.-P.Serre

لموضوع تمثيل زمرات جالواه من الدرجة الثانية، ولكن بدت هذه الفروض صعبة أيضًا وبعيدة. وحتى عام ١٩٨٥ عندما أتى جيرهارد فراى Gerhard Frey الحدس (الإدراك) الرئيسى للخطوات اللازم اتباعها. إن منحنيات $E_{a, b, c}$ لا تحقق فرضية تيمورا – تانياما – ويل، وإلا كان يجب تطبيق فرضيات سير على التمثيل الخطى لزمرة جالواه المطلقة ونحصل على تناقض.

هذا الإدراك العبقرى كان فعلاً فرضًا على فرضين: إنها تفرض أن المنحنيات $\Gamma_{a, b, c}$ إذا حققت فرض S T W (شيمورا – تانياما – ويل) فإنها ستحقق إذن فروض سير. إن فرضية فراى frey أثبته فى ١٩٨٦ كن ريبت Ken Ribet مما جعله يستحق جائزة فيرمات. إنه عمل محترم وشديد المهارة على الصيغة القياسية نثبته من خلال نظرية تنازلية بأسلوب فيرمات.

استطاع ريبت Ribet بواسطة فرضية شيمورا – تانياما – ويل إثبات عدم وجود الصيغة القياسية المكافئة العيارية المناظرة لتمثيلات زمرة الجالواة المطلقة عبر النقط ذات الـ P– تقسيم للمنحنيات $\Gamma_{a, b, c}$: هذه الصيغة القياسية ستكون بسيطة جدًا ومن ثم ستنعدم، وهذا مستحيل بما أن حدها الأول يجب أن يساوى q.

لم يبقَ سوى إثبات فرضية شيمورا – تانياما – ويل، كانت تبدو مهمة مستعصية حتى على المتخصصين الأكثر حذقًا، ومع ذلك أنجز أندرو ويلز Andrew Wiles هذا الدور (لفئة classe من المنحنيات الناقصية كبيرة بما يكفى لتحتوى منحنيات فراى)، فى ١٩ سبتمبر ١٩٩٤، بعد فترة كبيرة من التفكير المنفرد استخدم فيها أعمال العديد من الرياضيين (نذكر منهم على سبيل المثال لا الحصر تانيل Tunnel، لانجلاندز Langlands، سير Serre، مازير Mazur، تايلور Taylor، دى شاليت De Shalit).

أما عن فرضية S T W نفسها ماذا أصبحت؟ بعد أن أثبت أجزاء منها كل من براين كونراد Brian Conrad، وفرد دايموند Fred Diamond وريتشارد تايلور Richard Taylor، سقطت أخيرًا فى ١٩٩٩ بفضل عون حاسم من

كريستوف بروى Christophe Breuil. تم تطوير العديد من التطبيقيات على معادلات فيرمات بموازاة أعمال شديدة التقنية، وخاصة فرضية دينس (أصعب من فرضية فيرمات) والتى أصبحت نظرية دارمون ومريل Darmon , Merel.

ختام مختصر

إن اللغز الذى تحدثنا عنه كان مثيرًا قويًا لكتابة فصل من نظرية الأعداد ومثلها مر من اللغز إلى النموذج.

ولنتذكر ما قاله كون Kuhn فى هذا الموضوع:

"إن نجاح نموذج يرجع جزء كبير منه إلى وعد بالنجاح، ظهر بأمثلة مختارة وغير تامة. تعمل العلوم العادية على تحقيق هذا الوعد، بمد المعرفة بالحقائق التى يشير إليها النموذج ككاشفات خاصة، وبتعظيم العلاقة بين هذه الأفعال وتنبؤات النموذج، وبتعديل النموذج نفسه".

بالفعل امتد نموذج فيرمات للمعادلات:

$$x^p + y^p + l^\alpha z^p = o$$

$$p \geq 11,\ \alpha \geq 0,\ l = 3, 5,7,11,13,19,23,29,53,59.$$

كما وضعها سير Serre ورأينا أنه فى حالة $l=2,\ \alpha = 1$ سقطت فى حالة $(p \geq 3)$ بفضل دارمون Darmon ومرل Merel.

ولكن دارمون وجرانفل Granville مدوا الخطوة نفسها لمعادلات من نوع:

$$x^n + y^n = z^2 ,\ x^n + y^n = z^3 ,\ A x^p + By^q = Cz^r$$

سيكون من الخداع إذا اعتقدنا أن هذا الفصل ينهى نظرية الأعداد. بالعكس الصحيح، إنه يفتح الباب على فرضيات أخرى، (فرضية ABC، فرضية بيرش سوير نتونديير Birch, Swinnerton, Dyer... إلخ) يضمها برنامج ضخم،

(برنامج لانجلاندز Langlands) الذى يرمى لربط أجزاء كبيرة من الهندسة الجبرية بالجبر والتحليل.

لا نستطيع هنا الحديث عن كل هذه الألغاز، ولكن نميل مع ذلك لقول كلمة عن فرضية A B C أو لأنها تشبه فرضية فيرمات (التى أصبحت نظرية ويلز) إن العلاقة ABC هى من نوع:

$$A + B + C = 0$$

حيث A,B,C أعداد صحيحة غير صفرية وأولية فيما بينها، ونسمى "جذر" هذه المعادلة ويرمز له بالرمز (ABC) rad حاصل ضرب الأعداد الأولية، التى تقسم حاصل ضرب (ABC).

يؤكد زوج من الفروض المتشابهة (فرضية زبيروSzpiro المعلنة فى ١٩٨٣ وفرضية A B C التى أعلنها د. و. ماسر D.W. Masser وجى أسترلية J.Oesterlet فى ١٩٨٥) أكدت أن الأعداد A B C، لا يمكن أن تكون قيمتها المطلقة كبيرة عندما (A B C) rad تكون صغيرة.

بشكل أدق قليلاً، تقول فرضية زبيرو إن (ABC) لا يمكن أن تكون كبيرة جدًا عندما(ABC) rad تكون صغيرة وفرضية ABC تقول إن الأكبر sup (|A|,|B|,|C|)لا يمكن أن يكون كبيرًا جدًا ويكون (ABC) rad صغيرًا.

سوف نجد فى نصوص هلوجوارش وأسترلية المذكورة فى البيبلوجرافيا، مقولات دقيقة لهذه الفرضيات. علمًا بأن هذه الفرضيات حينئذ تقودنا إلى (بفضل نظرية لسيجل Siegel) علمًا بأن هذه الفرضيات تقودنا حينئذ إلى أنه لا يوجد سوى عدد منتهى من العلاقات (ABC) بحيث:

$$|ABC| > rad\,(ABC)^{4,41901}$$

(واحدة من هذه العلاقات أوجدها H. نيتاج A. Nitaj)

ولن يوجد سوى عدد منتهى من العلاقات ABC بحيث:

$$\sup(|A|,|B|,|C|) > \text{rad}(ABC)^{1.62991}$$

H أحد هذه العلاقات وجده إ. ريسات E. Reyssat. فى جامعة Caen)

تقودنا هذه الفرضيات إلى النظرية الأخيرة لفيرمات فى شكلها التقاربى:

يوجد عدد N بحيث إن المنحنى (F_n) لا يقبل سوى نقاط تافهة لـــ $p \geq N$.

فى الحقيقة إن فرضية Szpiro، مثل برهان ويلز، تأتى من نظرية المنحيات الناقصية؛ لأنه (منذ ١٩٧٢) نعلم أنه من المهم دمج مـــع العلاقـــة ABC منحنـــى ناقصى.

$$E_{A,B,C} \qquad y^2 = x(x-A)(x+B)$$

(لدينا مثلما بأعلى منحنيان إذا ساوينا بين المنحنى وصورته بأى إزاحة).

ليست فرضية Szpiro فى الحقيقة سوى ترجمة بمصطلحات العلاقة ABC لفرضية عن المنحنيات الناقصية مطبقة على المنحنى $E_{A,B,C}$.

ختام

هناك سؤال يطرح دائمًا هو معرفة إذا كان إثبات ويلز من الممكن أن يكون فيرمات قد عرفه؟ والإجابة على هذا السؤال بالنفى؟ حيث أتى برهان ويلز بـــشكل تقنى جدًا والتقنيات المستخدمة تميز رياضيات القرن العشرين.

ماذا نقول عن الاستراتيجية إذا كنا بعيدين عن النصائح الحذرة التى فرقهـــا ديكارت فى كتابه "القواعد لإرشاد العقل":

"إذا كان هناك فى سلسلة الأشياء التى نبحث عنها، يوجد الـــبعض الـــذى لا يستطيع فهمنا إدراكه بما يكفى، فيجب التوقف، ولا يجب اختبار ما بعد ذلك، ولكن نمتنع عن العمل غير المجدى (القاعدة الثامنة)".

إن الاستراتيجية العامة لا تمت لديكارت بصلة؛ حيث استبدلنا فيهـا مـسألة خاصة بمسألة عامة جدًا ونستطيع الإمساك بهذه الأخيرة عن طريق حدس تنجيمي.
من المؤكد أن ج. م. كينز J. M. Keynes قد أخطأ: فلم يكن نيوتن آخر السحرة!

المراجع:

- KUHN (T.-S.), *La Structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, 1983.
- GOLDSTEIN (C.), « Le métier des nombres », in *Éléments d'histoire des sciences*, Bordas 1989.
- GOLDSTEIN (C.), *Le Théorème de Fermat enfin démontré*, La Recherche, Hors série, L'Univers des Nombres, 2-8-1999, p. 21-29.
- HELLEGOUARCH (Y.), *Invitation aux mathématiques de Fermat-Wiles*, Masson, 1997.
- SERRE (J.-P), *Cours d'Arithmétique*, PUF, 1977.
- OESTERLÉ (J.), *Nouvelles approches du théorème de Fermat*, Séminaire Bourbaki 1987-88, n° 694.
- GELBART (S.), « An elementary Introduction to the Langlands Programme », *Bull. Of the Amer. Math. Soc.*, n° 10 1984, p. 177-219.
- CORNELL (G.), SILVERMAN (J.H.), STEVENS (G.), *Modular Forms and Fermat's Last Theorem*, Springer, 1997.
- WILES (A.), « Modular Elliptic-Curves and Fermat's Last Theorem », *Annals of Mathematics*, n° 142, 1995, p. 443-551.
- TAYLOR (R.) and Wiles (A.), « Ring theoretic properties of certain Hecke algebras », *Annals of Mathematics*, n° 142, 1995, p. 553-572.

أساسات الرياضيات(٥)

بقلم: جون-إيف جيرار
Jean-Yves GIRARD

ترجمة: مها قابيل

الشكلية الرياضية

إن القرن التاسع عشر هو قرن التأمل في التحليل - نظرية الدوال، والمشتقات، والتكامل. ذلك أن عملاً مؤثرًا أدى إلى اكتشاف، إلى جانب الدوال التقليدية مثل: **حا س sin x** "عابرين مستترين": مثل منحنى بلا مماس. فأصبح من الضرورى أن نهتم بطبيعة الأشياء الرياضية. لقد أتت **نظرية المجموعات لكانتور Cantor** كمحاولة للإجابة عن هذا السؤال، تلك النظرية التى تطورت فى ١٨٨٠ ولكنها لم تأخذ شكلها النهائى إلا فى بداية القرن العشرين. إن هذه النظرية تسمح بإعادة بناء الأعداد الحقيقية - المستخدمة فى التحليل - بدءًا من الأعداد الصحيحة الطبيعية ٠،١،٢،٣،... والتى عرفت من لا شيء، على الأقل كما نعتقد، وبذلك يكون الصفر هو المجموعة الفارغة...

إن **نظرية المجموعات** تقدم غالبًا كلغة الرياضيات. لا يوجد ما هو أكثر خطئًا من ذلك. فنحن إذا أردنا معالجة الأعداد الحقيقية متبعين تعريفها كمجموعة، لن نستطيع حل معادلة بسيطة من الدرجة الثانية. وعلى النقيض ففى الحقيقة تعلن نظرية المجموعات تعلن لأول مرة وحدة مبدأ الرياضيات. إن إمكانية من حيث المبدأ فقط، إرجاع كل الرياضيات إلى بناءات مجموعاتية، وإن كان ذلك خطوة هائلة - مما يسمح لنا أن نستخدم بلا تفرقة طرائق التحليل أو الجبر - والحساب

(٥) نص المحاضرة رقم ١٦٩ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٧ يونيو ٢٠٠٠.

بالحروف، أو المتغيرات، أو المعادلات- لحل مسألة، فهى لا تتعارض فيما بينهـا، على عكس وضع الفيزياء المكونة من جزر تربط فيما بينها جسور غير آمنة.[٦]

فى هذا المشروع التوحيدى، انتقل الدور المركزى للحساب- رياضة الأعداد الطبيعية، فظهر كتاب الحساب لبيانو Peano حوالى عام ١٩٠٠ واضعًا واحدًا من أقوى الأبنية الشكلية.

حساب بيانو

Arithmétique de Peano AP

سنحلق سريعًا فوق شكلية بيانو حدوده ses termes، وقضاياه propositions، ومسلماته axiomes، وقواعده règles.

الحدود: 0,x,y,z….; St; t+t'; t * t'

هذه الحدود تقرأ كالتالى: إما أن يكون الحد صفرًا أو أن يكون متغيرًا x، y، z، أو الحد التالى st لحد ما t[٧]، أو مجموع حدين $t+t'$، أو حاصل ضرب حدين $t\times t'$. الحدود هى بيروقراطية الأشياء التى هى فى حالتنا الأعداد الصحيحة. كذلك يمكن تمثيل العدد الصحيح 6 بـ "sssss0"، نلاحظ ارتدادا مؤثرا الترقيم إلى المرحلة ما قبل البابلية، 6 هى ست عصى s... تلك هى الحداثة.

القضايا:

$$t = t'; \neg p ; p\vee p' ; p\wedge p' ; p \Rightarrow p' ; \forall xp ; \exists xp$$

وتعرف القضية إما أن تكون تساو بين حدين t = t'، إما أن تكون نفيًا لقضية P ¬، أو الفصل بين قضيتين $p\vee p'$ أو الاتصال بين قضيتين $p\wedge p'$،

---

(٦) لقد أدخل بورباكى لفظة جديدة "الرياضيات" وبالفكر نفسه يجب أن نقول الفيزيائيات.

(٧) مثال للحد التالى: إذا كانت t=5 فإن s5=6، ss5=7، t=0 فإن s0=1، sssss0=5. (المترجمة)

أو الاستلزام $p \Rightarrow p'$ لقضيتين، أو تسوير الكمية "لكل" $\forall xP$، ° أو يوجد $\exists xP$. إن القضايا هى بيروقراطية الخواص.

مثلاً: فى حالة أس ٣ فى نظرية فيرمات كتبنا $t \neq u$ ولم نكتب $\neg(t=u)$

$$\forall x \ \forall y \ \forall z \ (x\neq 0 \wedge \ y\neq 0 \ \wedge \ z\neq 0) \Rightarrow (x \times(x \times x))+ (y \times (y\times y)) \neq (z\times(z\times z))$$

إن عملية كتابة القضية لا تعطى حكمًا مسبقًا عن حقيقتها؛ حيث تتساوى كل القضايا فى الحقوق فى البيروقراطية الشكلية، على الأقل إلى الآن.

مسلمات:

$$P \Rightarrow P \ ; x = x \ ....$$

هذه المسلمات المنطقية تترك دائمًا لاختيار الكاتب؛ حيث إنها لا تعلــن أى شيء جديد، ولكن ما هو مدهش بالأحرى أن نستطيع عمل شيء منها.

$$x+ 0 = x \ , x+Sy = S(x+y), (x\times0) = 0 \ , x\times Sy = (x\times y)+ x \ ; Sx \neq 0 \ ; Sx = Sy \Rightarrow x = y.$$

هذه المجموعة الثانية من المسلمات تعرف بشكل ما جمع وضرب الحــدود فى صيغة صفر و S مثلاً: حد مغلق (ليس له متغير) يمكن البرهنة بواســطة هــذه المسلمات على تساويه مع شكل مثل $\underbrace{sss......0}_{k}$ k مرة.

إن المسلمتين الأخيرتين متميزتان فيهما يضطران كل الأعداد الصحيحة $\underbrace{sss......0}_{k}$ أن تكون متميزة.

قواعد الإثبات:

$$\frac{P \quad P \Rightarrow Q}{Q}$$

$$\frac{P[0] \quad P[x] \Rightarrow P[S_x]}{P[y]}$$

إن الـــ Modus Ponens[٨] هى قاعدة كل تفكير رياضى، من هنـــا أثبـــت تمهيدية[٩] Lemme P، ثم Q ⇐ P - أى Q تحت الفرضية P مع إعادة تجميـــع القطع يمكن أن أحصل على Q، أما الاستنتاج الرياضى فهو يميز الأعداد الطبيعية. إن خاصية ما يمكن التأكد منها عند الصفر، ثم "تنتقل من كل عدد إلى العدد الـــذى يليه" فإنها صحيحة لكل عدد طبيعى. والتفكير الارتدادى recursion يعتبر لازمًـــا لإثبات المعادلة 0+x = x. والبرهان هو تسلسل من القواعد يبدأ بالمسلمات وينتهى بالنظريات (المبرهنات)؛ لاحظ الدقة المتناهية للآلة الرياضية.

رياضيات فى مقابل معلوماتية

على الرغم من بعض المواقف المبالغ فيها، لا يمكن التفكير فى الرياضيات كنشاط شكلى تمامًا وبيروقراطى؛ لأنه لا يوجد أى فريق بيروقراطى يـــستطيع أن يثبت نظرية فيرمات باكتشاف الإمكانيات الشكلية لحساب بيانو، وكان يلزم لإثبات هذه النظرية أفكار! من جهة أخرى فإن الإثبات الأتوماتيكى بالحاسب لا يعمل ولن يعمل بسبب هذه الأفكار.[١٠]

غير أن الرياضيات قابلة "للصياغة الشكلية"، وهذا يعنى أنها قابلة لأن تكتـــب بلغة شكلية، ولكن فقط من حيث المبدأ (كما كان التفكير سائدًا)، وهو لم يكن ســـوى أمنية فى بداية القرن العشرين وأصبح حقيقة. إن الحواسب اليوم قادرة على التحقـــق من البراهين الرياضية، وذلك يتطلب كثيرًا من العمل الـــذكى مـــن جانـــب مـــصمم

---

(٨) هى إصطلاح خاص بالمنطق الشكلى ويعبر عن طريقة تفكير يمكن تقديمها بالشكل التالى: «إذا كانـــت القضية أ صحيحة، وأ تستلزم q إذن q صحيحة». (المترجمة)

(٩) التمهيدية: نظرية تمهيدية تستخدم فى إثبات نظرية أخرى.

(١٠) إن النظرية الأولى لعدم الكمال تعتبر هى تفنيد للبرهان الأوتوماتيكى.

البرامج الذى يجب أن يدخل العديد من الاختصارات الخاطفة من نوع "تـرى جيـدًا أنه.." لأن الحاسب ليس سوى سيبرنطيقى غبى لا يرى شـيئًا، ولا يـشعر بـشىء ويمضى وقته فى تصحيح الأقواس مثلما يمضى الآخرين وقتهم فـى نـزع أجنحـة الذباب.

إن نشاط الحاسب هو شكلى بالفعل تذكروا الرسائل الرقيقة "خطـأ نحـوى" syntax error "خطأ فادح" ظهر عند ٠٠٢٨ "UNE ERREUR FATALE EST APPARUE À 0028:C000BCED DANS LE VXD VMM1(01)+0000ACED": إنها الدقة المطلقة، دون أن يكون ورائها فكر، تلك هى لغات الحاسب. تعد الشكلية الرياضية نوعًا من اللغة المعلوماتية. حيث إن اللغة الرياضية تنفذ بدمج المسلمات والقواعد مع الفرق الطفيف – الذى يمكن إهماله فى هذا العرض – إن اللغة المعلوماتية محددة – يجب تنفيذها فى ترتيب دقيق – فـى حين أن الأمر لا يحدث كذلك فى حالة الرياضيات. وهذا التشبيه ثمين جدًا طالما لم ننس أن الشكلية ليست سوى وجه واحد لـ الرياضيات.

ولنقف الآن عند الشكلية، ولنبدأ بالآلات فهى الأسهل. وقد يحدث كثيـرًا أن يعمل الحاسب مثل طاحونة دونما إعطاء أية إجابة؛ حيـث إنـه يـستمر يحـسب ويحسب ولا يتوقف والسؤال الذى يطرح نفسه (وهو المشكلة الأساسية فى اللغـات الشكلية): هل يجب الانتظار، أو نضغط Ctrl-c ونوقف البرنـامج؟ إنـه معـضلة dilemme قديم قدم مدينة روما: هل تنتظرون الحافلة ٦٤ رقم خط بيـازا فينيزيـا Piazza Venezia، ٦٤ الذى لا يأتى؛ ماذا نعمل؟ ننتظـر أم نعـود سـيرًا علـى الأقدام؟ فى الحالة الأولى نحتفظ بإيماننا غير مخدوش، فى الحالة الثانية نرضى أن نعود إلى بيتنا بعد مسيرة بسيطة... سؤال، هل يمكن اكتـشاف وضـعية الـدائرة المفرغةloop فى الحاسب؟ ومن ثم الفرصة لعمل Ctrl-C؟

إن الإجابة تبدو معقولة تمامًا كما أنه لا توجد أى خدمة قادرة على أن تقول لنا إن كانت الحافلة سوف تأتى فى النهاية، فلا يوجد أى وسيلة لاختبـار الـدائرة

المفرغة،[11] هى غياب المعلومة فى حالتها النقية، لا نعلم شيئًا لكن يمكن أن نعلم لاحقًا، ربما بعد عشر دقائق، عشرة أيام... إلخ. إن الإجابة على "مشكلة توقف البرنامج" هى إجابة سالبة؛ حيث إنها تظهر الفرق بين عدم المعرفة ومعرفة أن الإجابة "لا". هذا الفارق فى النوعية يشمل الجزء التقليدى من أساسات الرياضة، وسنجدها فى مختلف الأشكال، خاصة التمييز الفجوى / المتسع la distinction recessif/expansif ونظرية جودل Gödel.

قطر كانتور

فى مسيرتنا المنطوية على مفارقة تاريخية، لنعود لعام ١٨٨٠. ففى هذا الوقت،استطاع كانتور (وهو واضع نظرية المجموعات) أن يضع آلة جهنمية والتى سنجدها فى كل مسائل التأسيس. وهى التناقض فى الحالة الفطرية، فى هذا الصدد فلنذكر ξaóδ والتى يمكن قراءتها عقيدة، أو رأى، أو حدس. ويوجد إذن عدة أنواع من التناقض، الخاص بكانتور يصدم الحدس مثلما صدمت الأعداد غير النسبية مثل $\sqrt{2}$ حدس البعض فى زمن سابق.

إن المسألة هى العد: نستطيع عد الأعداد الصحيحة الزوجية ٠،٢،٤،٦؛ حيث إنها قائمة بلانهاية. ونستطيع عمل قائمة بكل البرامج فى لغة برمجة ما، مثلاً بترتيبهم حسب الحجم من الصغير إلى الكبير أو بتساوى الحجم فى ترتيب أبجدى ولكن هل نستطيع عمل قائمة بكل القوائم اللانهائية؟

إن إجابة كانتور سالبة وهى الحجة القطرية[12] argument diagonal الشهيرة: ليكن L_1, L_2, L_3 كل القوائم اللانهائية - لنقل - من الأصفار والآحاد،

---

(١١) الدائرة المفرغة: مجموعة من الأوامر يتكرر تنفيذها فى تتابع حلقى حتى يتحقق شرط معين. (المترجمة)

(١٢) هى إثبات أن هناك فئات لانهائية لايمكن وضعها فى شكل تناظر واحد - لواحد مع فئة الأعداد الطبيعية اللانهائية وتسمى فئات غير قابلة للعد uncountable set. (المترجمة)

ولنشير ب[n] L_m العنصر النونى للقائمة L_m، لكى نستطيع عمل قائمة

$$M = 1 - L_1(1) , 1 - L_2(2) , 1 - L_3(3)$$

أى أن $M[n] = 1 - L_n(n)$

لكن تكون M عنصر من عناصر القائمة وليكن $M = L_n$ ونستخلص أن

$$M[N] = L_N[N] = 1 - L_N[N]$$

و ينزل الستار!!!

الاتساع Expansivité

إن السؤال العام الذى يطرح نفسه بالنسبة للغات الشكلية هو الآتى: هل يمكن معالجة المعلومات السالبة؟ نعنى بالمعلومة السالبة، معلومة غائبة مثلاً: معلومة لم تصاغ. فى الستينيات اعتقد المشتغلون بالمعلوماتية قليلى الإبداع أن الإجابة بالإيجاب، لنأخذ مثالاً هذه الخانات التى لا نملأها، والتى تفسر كاختيارات **بالقيمة الأصلية**(١٣) إن الماكينة ترى أننا لا نجيب، وفى تعجلنا فى مهمتنا، بإهمال هذه التفاصيل الصغيرة. لا نملأ الخانة ولكن نضغط على زر الإدخال مما له من نتائج توضح للماكينة "عدم الرد". عندما تبلغها هذه الرسالة، تستطيع الاستمرار أو الانتظار مثل الطفل المطيع. ومرة أخرى ها نحن فى انتظار الحافلة ونعود لمشكلة التوقف. إنه تمامًا تناقض كانتور الذى يسمح بإثبات عدم إمكانية "اختبار الدائرة المفرغة loop" بمعنى استحالة معالجة معلومات سالبة.

هذا النمط من السلوك للغات المعلوماتية، سوف نطلق عليه الاتساع أو التمددية. فهذه اللغات تمددية لأنها لا تقبل سوى المعلومات الموجبة، وكلما أعطيناها، كلما سعدت، بمعنى كلما أعطتنا إجابات: فلنفكر مثلاً فى بحث عن ملف على الحاسب.

---

(١٣) القيمة الأصلية defaut: بارامترت تستخدم فى برنامج أصلى يرجع إليها وتستخدم عند عدم تحديد قيمة مخالفة لها. (المترجمة)

إن اللغة الرياضية تمددية (متسعة) recessive للأسباب نفسها؛ حيث إنها تراكمِ للنظريات، وكلما كان هناك المزيد من النظريات كلما أنتجت المزيد. إنها ليست الحالة العامة، فإذا فكرنا في الطب مثلاً: فإن الحقيقة الطبية حقيقة لم تؤكد، لنأخذ مثلاً الدم الملوث، أو الجدال حول OGM؛ فإن الحقيقة في الطب هي أكثر ما تكون فجوة، وترقق بالمعلومة.

المفارقات Paradoxes

كما سبق الذكر هناك عدة أنواع من المفارقات أكثرهم عمقًا هي مفارقات الحدس، التي تقاوم دائمًا كل ميل للتقليص. المنحنى بلا مماس، أو منحنى بيانو الذي يمر بكل نقط المربع ويجعلنا نشك في الفرق بين الخط والمستوى، إنها مفارقات حقيقية للحدس.

ولكن يوجد أيضًا المفارقات الشكلية؛ حيث إنها أقل عمقًا ولكن ذات أشكال مذهلة أكثر. هناك مفارقة رسل[١٤] عام ١٩٠٥ Russel الذي أحدث تناقض في النظرية البسيطة للمجموعات.[١٥] نذكرِ أن هذا التناقض تم الوصول إليه باعتبار المجموعة

$$X = \{x : x \notin X\}$$

ويمكننا في هذه الحالة أن نثبت أن تلك المجموعة تحقق في الوقت نفسه

$$x \notin X, x \in X$$

إن مبدأ المنطق

$$P \wedge \neg P \Rightarrow Q$$

(١٤)برتراند رسل الذي اشتهر في مجالات أخرى كثيرة.

(١٥)تم تصحيحها إلى نظرية zf زرميلو فرانكل Zermelo -Fraenkle.

يقول لنا من جانب آخر إن من التناقض نستطيع استنتاج أى شيء وهذا ما يهدم تمامًا اللجوء إلى الشكلية.

اقترح الرياضى الكبيرهيلبرت Hilbert منذ عام ١٩٠٠ أن يثبت الاتساق (أى عدم التناقض) فى **حساب بيانو AP**. وفى حوالى عام ١٩٢٠خفف من طموحاته بعمل برنامج[١٦] لا يستخدم المالانهاية إلا فى أضيق الحدود، وسنتحدث عنه مرة أخرى. يتعلق باختصار المفارقات إلى مفارقات شكلية فقط ، مع إهمال مفارقات الحدس؛ فالتناقضات الشكلية هى أكثر خطورة حاليًا، لكن مفارقات الحدس تمكث مثلما نخوض حرب ولا نغذى سوى الجبهة غير مكترثين بالمؤخرة.

التنحى La recessivité

إنها فكرة غريبة أن نحاول إثبات اتساق الرياضيات بطرائق رياضية، إن هذا يعد مثل البرلمان الذى يصوت على قانون للعفو عن أعضائه. هلبرت لا يقع تمامًا فى هذا الشرك: فليس من حقنا استخدام كل الطرائق المتاحة فى AP فقط نواة صغيرة مؤكدة من طرائق ما منتهية. ليس البرلمان الذى يقرر العفو ولكن لجنة منه مكونة من "حكماء".

نادى الحكماء ذلك هو أساسًا الخصائص المتنحية Recessives. أنه يعنى بالمتطابقات مثل:

$$\forall n \; (n+1)^2 = n^2 + 2n + 1$$

أو أيضًا

$$\forall a,b,c \; abc \neq 0 \Rightarrow a^3 + b^3 \neq c^3$$

---

(١٦)لقد أراد هيلبرت للرياضيات أن تصاغ على أساس منطقى قوى كامل، ويمكن لذلك أن يتحقق بما يأتى:
١- كل الرضيات تتبع منظومة من المسلمات المنتهية المختارة بعناية ٢- مثل هذه المنظومة من المسلمات يمكن إثبات اتساقها. (المترجمة)

مثلاً كان يمكن أن نحاول إثبات أن نظرية ما لها دائمًا (خاصية متنحية) عدد زوجي من الرموز: إذا كانت P قابلة للإثبات فهى لديها عدد زوجى من الرموز، ونفيها ¬P الذى لديه عدد فردى غير قابل للإثبات. ولكن هذا فعلاً شىء ساذج جدًا!

فلسفة بوبر Popper

إن الفيلسوف بوبر المشتغل الفلسفة الوضعية الحديثة، تبنى وطور أطروحات لهلبرت. من وجهة نظره فإن **المقولة العلمية** un énoncé scientifique ليس لها قيمة إلا إذا وجد بروتوكول قادرًا – من حيث المبدأ – على أن ينفيها. إن ما يمكن أن يتحقق تقريبًا مع قوانين الفيزياء، ونستطيع التأكد منه بدرجة من الدقة، هو هذا البروتوكول للتأكد الذى لديه حساسية لنفى القانون. هذا التناول يثرى نشاطات شبه علمية مثل الطب. فجملة "إلى هنا الأمور تمضى" هى نفسها مثال للمنهج العلمى حسب مفهوم بوبر. وإن كان فى رأيى أن السائق الجيد هو الذى يعرف طريقه وليس الذى لم تحدث له أى حادثة بعد.

إن التحقق فى الرياضيات بدرجة دقة 1/N، هو التحقق حتى العدد الصحيح N، مثلاً التحقق $(n+1)^2 = n^2 + 2n + 1$ حتى $n<10^{10}$. نرى أن البوبرية تعطى معنى للمقولات المتنحية فقط مثلها مثل هلبرت. وبالفعل فإن الاتساق الشكلى هو خاصية متنحية بالتالى فهى تنهج علميًا حسب بوبر: ونستطيع التعبير عنها بـ"إلى هنا لا يوجد تناقض". إن لديها فعلاً بروتوكولاً لاكتشاف **الخطأ**، واكتشاف التناقض، الذى يمكن بالصدفة أن يكتب بوضوح كما حدث فى تناقض رسل. لا يجب أن يدهشنا أن يكون الاتساق cohérence متنحى. إن هيلبرت لن يرفض دلالة لخاصيته المفضلة الاتساق.

إن العلاقة بين متنحى ومتمدد بسيطة؛ حيث إن خاصية ما تكـون تمدديـة (متسعة) عندما نفيها تكون متنحى، مثلاً "التى يمكن إثباتها"[١٧] تمددية (اتساع) فى حين أن "التى لا يمكن إثباتها"[١٨] متنحية (فجوة).

نظرية جودل Godel[١٩]

إن الشكلية هى نفسها أداة رياضية كما لاحظ هيلبرت فى عام ١٩٠٤، وذلك يأتى من الصرامة الشديدة للغات الشكلية، بالإضافة إلى أن هذه الملحوظـة تعتبـر قطعة أساسية فى برنامج هلبرت، الذى يستخدم وسائل رياضـية للوصـول إلـى نهاياته.

للغرابة كان يجب الانتظار حتى عام ١٩٣١ والرياضى جودل؛ لتؤخذ هـذه الملحوظة مأخذ الجد.

إن عناصر الشكلية لحساب بيانو AP الألفاظ والقضايا... إلخ، تقدم "بأعـداد جودل": $\lceil t \rceil, \lceil p \rceil$ إنه ترقيم عادى (تافه) للقضايا حـاول الـبعض أن يـرى فيـه دلالات مختبئة شبه رقمية – منطقية، ولكنها ليست تافهة فى النهاية إذا ما فكرنـا فى الصعوبات التقنية التى واجهها جودل فى عصره.

إن خصائص الشكلية تقدم فى شكل قضايا حساب بيانو AP، كذلك "P قابلة للإثبات" تصبح

$$\neg \mathrm{Thm}_{AP}[\lceil p \rceil]$$

---

(١٧)نتذكر "وصول الحافلة".

(١٨)بذلك "الحافلة لن تأتى".

(١٩)نشر جودل فى ١٩٣١ نظريات عدم الكمال فى مقال شهير وأثبت فى هذا المقال، أنه لأى نظـام مـن المسلمات قابل للعد قوى بما يكفى ليصف الحساب على الأعداد الطبيعية (مثل مسلمات بيانو أو ZFC) إذن: ١– هذا النظام لا يمكن أن يكون متسقًا وعاملاً فى الوقت نفسه. (وهو ما يعرف بنظريـة عـدم الكمال). ٢– اتساق المسلمات لا يمكن إثباته داخل النظام. (المترجمة)

في حين أن "AP متسقة" تصبح Coh_{AP} هذه القضايا ليس لها معنى رياضي مباشر.

إن إعادة تدوير هينة لقطر كانتور سوف تسمح بإنتاج فرضية G تكون حرفيًا

$$\neg Thm_{AP}[\ulcorner G \urcorner]$$

بمعنى عدم إمكانية إثباته. هل سننتهي إلى نسخة جديدة من تناقض الكذاب "إني أكذب" ومن ثم نحو تناقض **حساب بيانو AP؟**

لا: لا شيء يقول لنا إن الحقيقة والإثباتية متطابقان، وبالتالي "أنا لست قابل للإثبات" لا تعني "أنا غير حقيقي". عندما ننظر عن قرب نجد أنه يوجد إمكانية واحدة للخروج، أي الاحتفاظ باتساق **حساب بيانو AP**، **أي أن** G تكون حقيقية وعندها تكون غير قابلة للإثبات، وهي ما نسميه النظرية الأولى لعدم الكمال.

إن عملاً شاذًا لتشكيل النظرية الأولى يؤدي إلى النظرية الثانية، ويجعلنا نستطيع أن نأخذها كقضية حقيقية،غير قابلة للإثبات. إن قضية Coh_{AP} التي تعبر عن اتساق **حساب بيانو AP**، "إذا كانت متسقة فإنها لا تثبت اتساقها هي نفسها".

من المهم أن نلاحظ G، كذلك Coh_{AP} متنحية، ولكنهما غير قابلتين للإثبات. في المقابل فإن إثباتية G مثل إثباتية Coh_{AP} تمددية، إذن G وCoh_{AP} ليسا متكافئتين من حيث إثباتيتهما؛ حيث إن التميز بين المتمدد والمتنحي هو الفرق بين عدم المعرفة ومعرفة أنه لا، بين عدم القدرة على الإثبات وإثبات أنه لا. إننا دائمًا عند مشكلة التوقف، وباختصار.

متنحي ≠ متمدد

حقيقي ≠ قابل للإثبات

P لا يمكن إثباتيا ≠ **P** ¬ قابلة للإثبات.

مثل تلك النتيجة لا تجلب لك كثيرًا من الأصدقاء، وردود الأفعال على نظرية جودل كانت عنيفة، وغالبًا كلها ذات طبيعة سلبية أو بالأحرى رافضة négationniste. ولنبدأ بأولئك الذين يقدمون بشكل منتظم اعتراضات حول نظرية جودل. إنها متوافقة مع رؤية معينة لمفهوم البوبرية؛ حيث إن كل شيء خطأ، فضلاً عن أنه بعد قليل من الوقت يبدو كل شيء فاسدًا. إن تفنيد نظرية جودل – التي تم إثباتها يتضمن تناقض في **حساب بيانو AP** نحن نرى أن هؤلاء الأشخاص وهم في الواقع مستثارون بشكل خاص ببداية الألفية الثانية – لا يهدفون إلا إلى نقض هذا البناء المدعي الرياضيات. إن تفنيد نظرية جودل بالنسبة وقودًا لهم، أما بالنسبة لنا فهو ليس إلزامًا.

من جهة أخرى فإن تفنيد نظرية جودل يقويها، وفي الحقيقة **AP** تصبح متناقضة، ولكن النظرية هي "إذا كان **AP** متسقة" وكأننا يمكن أن نستخلص أي شيء من شيء خاطئ، هذه النظرية لا يمكن إغراقها! وخاصة أنه لا يوجد أي بروتوكول قابل لأن يضعها كخطأ، لن يكون لدينا إذن أي منهج علمي إذا اتبعنا بوبر، إلا إذا افترضنا أن البوبرية ينقصها القوة!

يأتي هؤلاء الذين يحنون إلى "الحل النهائي" بعد المهرجين، – إذا استعدنا التعبير الخاص المنهج العلمي الألمانية – لمشكلة الوضوح. هنا يصبح الأمر أكثر التواءً، فيتم الاحتفاء بجودل كأحد أكبر المنطقيين على مر العصور ، ويتم إبراز ما يشوب أعداد جودل من غرائب وتصبح النتيجة نوعًا مثاليًا من قطع البازل super-puzzle (لعبة فائقة لتجميع صورة من أجزائها). ويكون هذا النوع من الدفن تحت فضاء من الزهور خاصية تميز "جودل – إشر – باخ" Godel-Escher-Bach أو صرح السوقية بجدارة. وتصبح الرسالة الضمنية شديدة الوضوح، إن نظرية جودل هي مجرد نتيجة صناعية ضد الطبيعة لا يمكن أن تربك مسيرة العلم الوضعي الناجحة.

مع ذلك فإن هذه النظرية بسيطة حيث إنها تقول إن البرلمان لا يمكن أن يتم العفو عنه من قبل لجنة فرعية – ولا حتى أن يعفو عن نفسه بنفسه. الأمر يتطلب أن ينضم إليه أعضاء من الخارج، أليس هذا ما جرت عليه العادة؟ أو بشكل آخر لا أستطيع ملاحظة النظارة وهى على أنفى.

من البديهى أنه ليس دائمًا ما يمكن التعبير عن العقل السليم بشكل جذرى ولكن يجب القول إن هيلبرت قد وقع فى فخ كبير ببحثه عن حل شكلى لمشكلة الاتساق. بالفعل إن الشكلية تنفى نفسها نتيجة تشبعها بالتبسيط العلمى؛ لإثبات الاتساق فى الرياضيات.

ما بعد الجودلية

إن الدور المركزى الذى يلعبه الاتساق هو من أكثر الأشياء انتقادًا فى الإيدولوجية الشكلية؛ حيث كما لاحظه رجل المنطق **كرايسل** Kreisel، الذى عمل كثيرًا ضد تجاوزات الشكلية: حيث إن الشكوك فى مجال الاتساق هى محل شك أكثر من الاتساق نفسه. من جهة أخرى يوجد الكثير من نظريات الاتساق دون أن يكون لها أدنى أهمية فلماذا نتوقف عند هذا الجانب المهمش من الشكليات؟ من جهة أخرى ماذا تقول عن التحكم التقنى فى السيارات؟ هذا التحكم الذى لا يهتم سوى بموضوع واحد، هو حسن سير المحرك، ويجعل السيارات تمر دون عجلة قيادة (دركسيون) أو فرامل؟

يبقى الاتساق رغم كل الجهود الفكرية، ويبقى موضوع إيديولوجى تمامًا: "إنى أعلم أن إثبات الاتساق لـ **ZF** ليس له قيمة، ولكن قيمته أنه يطمئننى أن هناك إثباتًا ما"(٢٠)، نطمئن ضد أى خطر وبأى الطرائق؟ طريقة هذا المنتج الذى لا يتغير، الاطمئنان أن الأرض لن تنفجر. إذن ليس مدهشًا أن نبحث دائمًا فى مد برنامج هيلبرت، بهدف إعادة إصلاحه قليلاً.

---

(٢٠) الكلام على لسان رجل المنطق الشكلى ك.شوت K.Schutte وموجه للكاتب فى ١٩٧٢.

ما هو أكثر غرابة ليس هذا الاحتياج لاعتقادات لهيلبــرت ولكــن النجــاح المتناقض لبعض الأعمال، مثل أعمال جنتزن Gentzen فى الثلاثينيات. لقــد تــم وضع هذه الأعمال من أجل إصلاح برنامج هيلبرت، فلم تصلح شيئًا البتــة. علــى العكس لقد جلبت – بعد ذلك بوقت كبير ولنقل بعد عام ١٩٧٠ – تجددًا لا شــكالية الأساسات.

كيف نعيد قراءة جنتزن حاليًا؟ إن أعماله تعكف على دراسة التفاعــل بــين إثبات P، وإثبات ¬P (فى حالة التناقض). وتترجم حاسوبيًا إلــى: التفاعــل بــين برنامج (متعلق بإثبات P) والمحيط به environment son (المتعلق بإثبــات ¬P) تمامًا بين الحجة والوظيفة. هذا ما أســميناه "النمــوذج" لكــارى هــوارد Curry-Howard(١٩٧٠)

إن هذه الأفكار يجب أن تنقح عن طريق المنطق الخطى والتى تدخل تماثــل بين البرنامج وما يحيط به. والحداثة بالنسبة للمنطق القديم (الذى نقول عنه اليــوم التقليدى) يعنى بوجهة نظر إجرائية (فالمنطق الخطى لا يتم إرجاعه إلى إجراءاتــه الذاتية) وليس واقعيًا (إرجاع المنطق الكلاسيكى إلى حقيقة خارجية).

الجنان أو انطفاء البوبرية

إن المنطق الخطى يشرح الرياضيات بطريقة مجنونة، وكأنهــا نــوع مــن اللعب.

إذا كان هناك ماكينتان M, N تتحدثان فى مكان مغلق كل منهما تستطيع أن تختار تصميم أو برنامج "يختبر الأخرى". إذن **متفق عليه** ليكن بعد فترة من الوقت ستنتهى واحدة منهما بالعزوف عن العمل، مما يؤدى إلى **انشقاق** أو يبقيــان فــى شجار إلى مالا نهاية.

نقول أن M, N لهما سلوك *متبادل عندما لا تسمح* M *سوى* بالتصميم المتفق عليه مع تصميمات N والعكس بالعكس.

ترتبط الماكينة M بالتفسير الإجرائى التالى: كل اختبار فى N يكون لدىَّ أنا (مع "التصميم" الذى اخترته) الكلمة الأخيرة فى التفاعل. إن ذلك يشبه البوبرية، أى اجتياز عدد لا نهائى من الاختبارات، ولكنه ليس كذلك. فى الحقيقة ما اختبارات N ؟ إنها تلك التى ليس لها انشقاق (بمعنى رفض) مع تصميم M ؛ حيث M لها فى مدماجها تصميمات أخرى والتى ليست هنا لتقول كلمتها الأخيرة ؛ فقط لرفض بعض الاختبارات المزعجة. إن الحداثة بالنسبة للبوبرية، هى أن المفهوم نفسه للاختبار قابل للاختبار، مما يسمح بالخروج من الغل المتنحى/ المتمدد. نستطيع مبدئيًا أن نعطى معنى تفاعلى لكل الرياضات الحديثة.

إن التصميمات هى نوع من البرهان نسمح فيه بالخطأ المنطقى طوعًا: **إبليس هو الذى يعزف عن العمل وهو الذى لا ينتظر الحافلة**؛ إنها نوع من المسلمة المتوحشة. وسوف تفسر الرياضيات فى النهاية خارج أى واقع خارجى، بتفاعل بين (التصميمات) التى من الطبيعة نفسها، إنها ثنائية واحدية une dualité moniste (تحتمل الهين).

الموجات والثورة الرقمية[٢١]

بقلم: إيف ماير

Yves MEYER

ترجمة: مها قابيل

صيحة المويجات

إنها موضة المويجات لذلك جعلونى أتحدث عنها فى جامعة كل المعـــارف؛ لأنها تستخدم فى "التكنولوجيا الحديثة" (الوسائط متعددة، والمعـــايير الحديثـــة فـــى ضغط الصور الرقمية... إلخ)، وسنعود لذلك لاحقًا.

وهى ظاهرة دولية. بقراءة عـــدد مـــايو ٢٠٠٠ مـــن المجلـــة الأمريكيـــة *«Notices of the American mathematical society»*

نجد فى الصفحة ٥٧١ إنجريد دوبيش Ingrid Daubechies، يتلقى جـــائزة عن أعماله على المويجات، وفى صفحة ٥٧٠ رونالد كوافمان Ronald Coifman يحيط به الرئيس السابق كلينتون لمشاركاته فى التحليل بالمويجات.

إنها صيحة المويجات كما كانـــت مـــن قبـــل صـــيحة الفوضـــى chaos، والكسوريات ونظرية الكوارث. فى كل هذه الأمثلة يكون الـــدافع وراء الأبحـــاث بعض الظواهر المركبة، التى نراها حقيقة فى الطبيعـــة والتـــى يجـــب دراســـتها وتحليلها.

هنا نضع إراديًا "الطبيعة" فى مواجهة "المعمـــل" ولقـــد كتـــب بريجـــوجن Prigogine فى *قوانين الفوضى*: "إن ما يهمنا الآن ليس بالضرورة مـــا يمكنـــا أن نتنبأ به بثقة فإذا كانت الفيزياء التقليدية قد اهتمت أولاً وقبل كل شيء بالـــساعات،

---

(٢١)نص المحاضرة رقم ١٧٠ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٩ يونيو ٢٠٠٠.

فإن الفيزياء الحديثة تهتم بالسحاب". فالفيزياء التى يتحدث عنها إيليا بريجوجين Ilya Prigogine هدفها بلورة الظواهر الطبيعية، وهو رأى بينواه ماندلبروه Benoît Mandelbrot نفسه تقريبًا: "إن العالم الذى يحيط بنا مركب جدًا. والأدوات التى نضعها لوصفه محدودة جدًا". وسوف تقود أشكال السحاب ماندلبروه للكسوريات.

وقد حدد الرياضى رينيه توم René Thom لنفسه هدفًا ألا وهو اكتشاف الـ morphogenèse (تكوين أشكال جديدة عن طريق الحاسب)، وظهور الأشكال أو الأحداث غير المتوقعة بمساعدة "نظرية الكوارث". فبعض الباحثين يرون أنها نظرية مهمة ومفيدة للغة مثل فائدتها فى دراسة الثورات التى تظهر فى السجون.

ويعتبر ديفيد رويل David Ruelle مؤلف "نظرية الفوضى المحددة" théorie du chaos déterministe، والتى يطبقها بنجاح فى دراسة الاضطراب الدوامى turbulence وهى ظاهرة طبيعية أخرى غير مفهومة جيدا. يُعنَى الاضطراب الدوامى بظهور دوامات فى سريان السائل أو دراسة العواصف فى سريان الجو.

تنطبق هذه الملاحظات نفسها على المويجات. إن "نظرية المويجات" هى أيضًا مدفوعة بدراسة الظواهر الطبيعية، وتشمل هذه الدوافع إشارات الكلمة، والموسيقى، والصورة، وعملية الإبصار البشرى... إلخ.

إن نجاح هذه النظريات بالنسبة للجمهور العريض يأتى من أنها تدرس تركيب العالم المألوف الذى يحيطنا، وتحدثنا عن الزمن، والمسافة، والسببية، والمستقبل المخيف وغير المنظور، وأشكال السحاب كذلك بناء اللغات والكثير من الأشياء الأخرى التى تمسنا.

لم يبق الباحث معزولاً فى برجه العاجى حيث يكون وحيدًا، بل أصبح يميل لأعمال هو نفسه الذى أبتدعها. إن بعض العلماء مثل بير جيل دو جين Pierre-Gilles de Gennes يهنأون أنفسهم للتطور العلمى فى اتجاه الأشياء الفورية، والبسيطة فى مظهرها ولكنها مركبة جدًا فى (داخلها).

مع ذلك فإن النظريات الأربع (المويجات والفوضى... إلخ) لا تتمتع بسمعة طيبة لدى كثير من العلماء الذين يعتبرونها أقرب إلى لغة الشعر من لغة العلوم. وسوف نجد لغة الشعر أو حتى لغة النبوءة فى البرنامج العلمى لجوزيف فورييه Joseph Fourrier الذى سيأتى وصفه فيما بعد. نهدف هنا لأن تفتح هذه النظريات مجالات ممتدة، وعمومًا فإن الصور الفكرية schémas intellectuels التى تقترحها لا تتوقف على السياق العلمى، وكذلك بالنسبة لكل المذاهب الأخرى وهوما يثير الشك. بالإضافة إلى أن كثير من الأعمال المستخدمة لهذه الرسوم المفصلة الحديثة ذات نوعية متوسطة.

كتب ديفيد ريويل فى *الصدفة والفوضى hazard et chaos*: " فلنعد إلى نجاح نظرية الفوضى ولقد كان هذا النجاح مكسبًا للرياضيات حيث استفادت نظرية النظم الديناميكية من الأفكار الجديدة دون تشتيت مناخ البحث (لأن الصعوبة التقنية للرياضيات تجعل من الغش مهمة صعبة) ولكن فى فيزياء الفوضى كان النجاح للأسف مناظر لهبوط إفراز نتائج مهمة. هذا رغم الإعلانات الانتصارية عن نتائج أحدثت ضجة شديدة".

تنطبق هذه الملحوظات على نظرية المويجات، فيبدأ الباحث فى الشك؛ حيث يشك فى البناءات الفكرية التى تهدف لشرح كل شيء. وفى المويجات، ويصبح كل ذلك مقلقًا جدًا ويجب أن نعرف أكثر مما يخولنا لطرح الأسئلة الأربعة الآتية عن نموذج المويجات:

- هل المويجات اكتشاف عملى مثل العجلة؟

  (لا يوجد بديهيًا علم العجلة، ولكنها منذ اكتشافها لم يتوقف استخدامها).

- هل المويجات نظرية؟ وإذا كانت الإجابة نعم فلأى قطاع علمى تنتمى هذه النظرية؟ وكيف يمكن تأكيد هذه النظرية أو دحضها؟
- يوجد احتمال ثالث. أن يصبح نجاح نظرية المويجات مثله مثل الكسوريات والفوضى، ناتج عن سوء فهم؛ حيث إن أحد الآثار الضارة للتعميم أن وضعت

أداة علمية كان يجب أن يكون استخدامها محدد بسياق معـــين. هــل يجــب أن نتحدث عن عملية نصب؟

- بمعنى مختلف هل النجاحات التى حققتها المويجات تفــسر مــا يقــول عليــه الأنجلوسلكون تخصيب متبادل.

كلمات توضيحية: قد يحدث أن بعض القطاعات العلمية الحديثة تلقح بطرائق أو مفاهيم آتية من مذاهب أخرى. فمثلاً السرعة فــى الميكانيكــا أصــبحت هــى "المشتقة" عند الرياضيين، وتسهم الآن فى دراسة كل تعديل لظاهرة معتمدة علــى واحد أو أكثر من البارامترات. لا يوجد هنا أى خداع.

بطرح هذه المشكلات، سنحاول حلها باستخدام طرائق تاريخية. إن الأعمال المعاصرة على المويجات مزودة بثلاثة برامج علمية. بتحليل هذه البرامج ســنفاجأ باكتشاف هذا الطموح نفسه فيها، وهو الطموح الذى يسعى لعرض كل المعــارف التى ينتقدها البعض فى "نظرية المويجات"، وسوف نجــد فيهــا الــشكوك نفــسها والتحديات والمجازفات بالغش نفسها الموجودة فى النظريات السابقة.

سنرجع أولاً لجوزيف فورييه لقــد افتــرض برنــامج مــا بــين العلــوم interdisciplinaire الذى سوف نحلله بشكل مفصل فى الجزء القادم.

ثم نختبر بعد ذلك برنامج (هيئة توحيد العلــوم) institute for the unity of science وهو أكثر مثالية من برنامج فورييه وأكثر طموحًا، حيــث يــضم هــذا البرنامج ما يعرف اليوم بالعلوم المعرفية وأدى إلى فهم ثم بناء الحاسبات الأولــى، ولقد سبق التفكير النظرى التطبيق (التكنولوجى)!

سوف نأتى أخيرًا إلى "تنقل الأثاث" وقد بدأه جون مورليه Jean Morlet فى عام ١٩٨١م عندما كان مهندس أبحاث فى إلف - أكيتن Elf-Aquitaine، حيــث إنه اقترح المويجات (زمن- مقيــاس) les ondelettes (temps-échelle) كــأداة تسمح بتحليل أفضل لبعض إشارات الزلازل.

إن دراسة الطرائق التى أدت، عبر التاريخ، إلى الأعمال المعاصرة، ستسمح لنا بالإجابة أخيرًا عن الأسئلة الأربعة التى طرحناها وستكون هذه هى الخاتمة.

برنامج فورييه

من المهم أن نبدأ ببرنامج فورييه لأن اكتشاف المويجات يقع فى منطق هذا النص نفسه الذى يستشرف آفاق المستقبل.

فى عام ١٨٢١م منذ حوالى قرنين كتب فورييه فى *خطابه التمهيدى* الشهير:

"إن الدراسة المتعمقة فى الطبيعة هى المصدر الخصب للاكتشافات الرياضية. ليس فقط فى هذه الدراسة التى تقدم للباحثين هدفًا محددًا والتى من مميزاتها استبعاد الأسئلة غير المحددة، والحسابات التى بلا حدود: إنها وسيلة لتكوين التحليل نفسه واكتشاف العناصر التى يهمنا أن نعرفها فيه...

من هذا المنظور فالتحليل الرياضى ممتد مثل الطبيعة ذاتها، فهو يقيس الوقت والقوى والحرارة... هدفه الرئيسى هو الوضوح، فليس للتحليل الرياضى إشارات للتعبير عن المفاهيم المختلطة، وهو يقرب الظواهر الأكثر اختلافًا ويكتشف التشابه الخفى (الأكثر سرية) الذى يوحدهم.

إذا كنا لا نستطيع الإمساك بالمادة مثل الضوء والهواء لصغرهما الشديد، وإذا كانت الأجسام بعيدة جدًّا عنا فى الفضاء الواسع، وإذا كان الإنسان يريد أن يعرف مشهد السموات فى حقب متتابعة يفصل بينها عدد كبير من القرون، وإذا كانت أفعال الجاذبية والحرارة تمارس داخل الكرة الصلبة فى أعماق تبقى دائمًا بعيدة المنال، فإن التحليل الرياضى يستطيع أن يمسك بقوانين هذه الظواهر. فيجعلها موجودة وقابلة للقياس، إنها تبدو ملكة للعقل البشرى مرصودة للتعويض عن قصر الحياة وعدم كمال الحواس، والملحوظ أيضًا أن التحليل الرياضى يتبع المسيرة نفسها فى دراسة الظواهر المختلفة، فيفسرها باللغة نفسها كأنما ليثبت وحدة

وبساطة مستوى الكون ويجعل هذا النظام الثابت الذى يترأس كل قضايا الطبيعة أكثر ظهورًا".

يجب أن نلاحظ أن فورييه قد أعطى للرياضيات دورًا مبتكرًا بعيدًا عن وضع الرياضة فوق العلوم الأخرى، فإنه يطلب بالعكس، إن يغذى البحث فى الرياضيات بمشكلات علمية. يتعارض هذا الوضع مع ما ذهب إليه ريتشارد ديدكايند Richard Dedekind، واستعاده جون ديو دونه Jean Dieudonné حيث الرياضيات معزولة عن العلوم الأخرى، وتدرس "لشرف الفكر البشرى".

يُعد تحليل وتركيب الأصوات باستخدام الأصوات النقية واحدة من أكثر الاستخدامات ذيوعًا لتحليل فورييه، حيث يتميز الصوت بارتفاعه وشدته وطابعه، ويسمح استخدام متسلسلات فورييه بتفكيك الأصوات إلى أصوات نقية، والعمل على تحديد وحساب الخواص. ويتمييز طابع الصوت بالشدة النسبية لتوافقياته. لهذا السبب يسمى تحليل فورييه عادة تحليل (توافقى).

وتعرف الأصوات النقية بمعلم برامتر واحد وهو التردد، حيث إنها اهتزازات مثالية، وخالدة، وبلا بداية أو نهاية، أرسلت منذ بدء الزمن وتستمر إلى الأبد. إذا قبلنا قوانين فورييه لهذه الاهتزازات، القوانين المضبوطة بالنسبة للرياضيين ولكنها قابلة للاختبار بالنسبة لعلماء الصوت، إذن فإن بدايات وانقطاعات الصوت التى نسمعها ترجع إلى تداخلات هدامة، مولدة الصمت بدءًا من مقابلات مضبوطة فى الطور.

نستطيع أن نقدم تحليل فورييه كأوركسترا مثالية يلعب فيها كل عازف بلا نهاية النوتة نفسها، ويأتى السكون من الأصوات التى تلغى بعضها البعض وليس بسبب غياب الصوت.

من المفهوم أنها ليست هذه هى الطريقة التى يلعب بها أوركسترا حقيقى الموسيقى أو يتوقف عن اللعب والمتغير الزمنى يجب أن يلعب دورًا أكثر فاعلية وديناميه.

إن هذا التفكيك للأصوات إلى أصوات نقية غير مثالى؛ لأنه لا ينتبه في حالة الموسيقى، للأصوات المركبة الناتجة عن لمس الآلة، والبحث في النوتة، وعمومًا إنه لا يتواءم مع دراسة الأصوات الانتقالية والضوضاء المتنوعة. فإن تحليل فورييه ليس فعالاً إلا إذا كان محددًا بدراسة الظواهر الدورية أو الظواهر الثابتة بشكل عام.

تم عمل تعديلات وتحسينات على تحليل فورييه آخذين فى الاعتبار ظواهر أخرى غير ثابتة، وعلى الأخص ظواهر انتقالية وهكذا ولدت الموجات "زمن- تردد" "les ondelettes temps –fréquence" وبعكس الموجات فهى لها بداية ونهاية مثل نوت قطعة موسيقية. إن التحليل باستخدام الموجات يمكن تمثيله بالتجزئ الموسيقى، حيث الفترة الزمنية للنوتة موضحة كذلك ارتفاعها. ولكن يطمح التحليل بالموجات أن يكون وصفًا مضبوطًا وليس رمزيًا للحقيقة الصوتية. بهذا المعنى فهو أقرب إلى الإسطوانة المدمجة الصوتية منها إلى التقسيم لأن التركيب الذى يعتبر جزءًا من التحليل بالموجات يحدث أتوماتيكيًا ولا يحتاج إلى تفسير.

تم بحث الموجات التى تتلاءم مع الإشارات الصوتية منذ عام ١٩٤٥ على يد ليون بريلوين Léon Brillouin، ودنيس جابور Dennis Gabor ، وجون فون نيومان John Von Neumann، وسنعود لهذه الأبحاث فى الجزء القادم. لقد عمل هؤلاء الرواد اختيارات تعسفية قائمة على أولوية قابليتها للنقاش، حيث تعتبر موجات جابور أو كما يطلق عليها الفرنسيون جابوريت إشارات موجية (جا أو جتا) يتسع ترددها أو يوهن عن طريق غلاف جاوس enveloppe de Gauss. يتم تحريك الموجات عن طريق نقلات تتواءم مع الترددات المستخدمة. إذا استخدمنا فقط ترددات كاملة فى متوالية حسابية فإن هذه النقلات يجب أن تكون مضاعفات لـ٢ط نق. هذه الخيارات الحسابية هى الخاصة بمتسلسلات فورييه. ولكن أثبت روجر بالان Roger Ballan وفرانسيس لو Francis Law إن هذا النظام لا يسمح بتقديم دوال اختيارية. تعتبر الموجات المستخدمة اليوم هى أكثر دقة، فهى ولدت فى عام ١٩٨٧ نتيجة لأعمال كينث ولسون Kenneth Wilson (الذى حصل على

جائزة نوبل عن أعماله فى إعادة القياس renormalization والظواهر الحرجة).
وحسنها عام ١٩٨٩ كل من إنجريد دوبيش، ستيفان جافارد Stéphane Jaffard ، جون-لن جورنيه Jean-Lin Journé، ثم رونالد كوفمان وأنا نفسى عام ١٩٩٠ونشير أيضًا إلى أعمال هنريك مالفار Henrique Malvar. وتستخدم هذه المويجات فى الصوت الرقمى دولبى الذى يصاحب اليوم معظم الأفلام. وسنعود إلى هذا التقدم التقنى.

لا يستخدم تحليل فورييه فقط لتحليل الأصوات ولكن أيضًا فى معالجة الصورة ويدخل بشكل حاسم فى علم البلورات، والبيوكيمياء وفى مجالات المعرفة المختلفة والمتنوعة، حيث يستحيل عمل قائمة شاملة. لقد كان لدى فورييه الحدس وتحققت نبوءته.

برنامج مؤسسة توحيد العلوم

فى عام ١٩٤٤ قبل وجود الحاسبات، اقترح مجموعة من الرياضيين مثل: جون فون نيومان، وكلودشانون Claude Shannon، ونوربرت وينر Norbert Wiener وفيزيائيين مثل: ليون بريلوين، ودينيس جابور، وأوجين فيجنر Eugène Wigner وباحثين آخرين اقترحوا وأطلقوا برنامج علمى هدفه مد العلوم المعرفية "التى لم تكن موجودة فى ذلك الوقت" بحركة التوحيد التى عملت بها العلوم الفيزيائية فى نهاية القرن التاسع عشر.

المقصود هو توحيد إشكاليات الميكانيكة الإستاتيكية، والديناميكيا الحرارية، وحساب الاحتمالات. ومن هذا التوحيد ولد مفهوم التعادل الحرارى إنتروبيا entropie. بفضل مفهوم التعادل الحرارى استطاعوا إعادة تقنين المبدأ الثانى للديناميكا الحرارية، أو انهيار الطاقة غير القابل للانعكاس degradation irreversible de l'énergie وذلك أثناء تحويلات نظام يفترض أنه معزول. ويحدث انهيار؛ لأن التعادل الحرارى الذى يقيس الفوضى، يزداد بشكل حتمى.

منذ بداية سنة ١٩٤٥، جاءت لكلود شانون Claude Shannon بفكرة تطبيق مفهوم **التعادل الحرارى** على نظرية الاتصالات، مع تحديد رتبة **التعادل الحرارى** المقاسة (الرتبة هى **التعادل الحرارى** متأثرة بإشارة سالبة)على كمية المعلومات المحتواة فى رسالة ما. وهناك اكتشاف ثانٍ عظيم لشانون فى مجال الاتصال عن بُعد يخص تدفق قناة النقل. هذه القناة التى تقدم تصور مسبق لمسارات المعلومات، تعرف بما يسمى تردد القطع fréquence de coupure، وجود هذا التردد يأتى من محدودية التكنولوجيا. فتردد القطع للقناة السمعية للإنسان هو ٢٠,٠٠٠ هرتز. وقد حسب شانون أقصى حجم للمعلومات التى يمكن نقلها فى ثانية، بمساعدة قناة يكون تردد القطع لها ثابت، مع وجود ضوضاء بسيطة.

وهكذا وضعت إشكالية ازدحام مسارات المعلومات، والسؤال الثانى هو ما الاستخدام الأمثل لهذه القناة، وكيف يمكن تدوير هذه المعلومة بتناغم دون اصطدام؟ مثلما أشرنا فى الجزء السابق، فإن الآباء المؤسسين (شانون، وجابور، وفون نيومان، وبرلوين) تطرقوا لهذه المشكلة وسميت الحلول التى توصلوا إليها "بمويجات شانون"، و"مويجات جابور" وقد كان استخدام هذه المويجات مقصورًا على معالجة الكلمة؛ لذلك سميت لوجون "logons" أو عناصر الخطاب. وقد تم تحسين هذه الحلول الأولى مما قادنا إلى القواعد المتعامدة للمويجات bases orthonormées d'ondelette (زمن- تردد) التى تمت الإشارة إليها.

وقد كان الدافع وراء هذه الأبحاث هو المشكلات المطروحة من قبل الاتصالات التليفونية. ولم تكن معالجة الصور ضمن برنامج مؤسسة توحيد العلوم.

من هذا المنطلق تكوَّن برنامج مؤسسة توحيد العلوم من ربط الأفكار الأكثر حداثة التى تجرى فى مجال "العلوم الصعبة" بالتقدم فى دراسة النظم البنائية للغات الطبيعية والحية. وهذه العلوم تشمل كلاً من الفيزياء، والميكانيكا الإستاتيكية، والإلكترونيات، والمنطق الرياضى وبدايات علم الروبوت والمحاولات الأولى لفهم ما يمكن أن تصبح عليه دراسة التركيب.

نشر نوربرت وينرNorbert Wiener في عام١٩٥٠ بحث بعنوان "الكــلام، واللغة، والتعليم" حيث استخدم اكتشافاته فى التأثير الرجعــى retroaction et feed back. وفى ١٩ يناير ١٩٥١ أعلن فينرWiener وروزنبلــت، Rosenblithعــن برنامج الرقابة والاتصالات Et Communication Cybernique فى إطار مؤسسة توحيد العلوم. ويكمن البرنامج بشكل خاص فى تفسير طرائق عمل اللغــة والمــخ والفكر البشرى بدءًا من نماذج مستخرجة من المنطق والذكاء الــصناعى، وكــان يجب فهم الآلية المنظمة لعلم الأحياء بمساعدة التأثيرات الرجعية والتــى اكتــشفها ودرسها نوربر وينر.

لقد كانت المؤسسة بناء مرنًا، مؤسسة بلا حوائط، تــسمح بتمويــل وتــآلف أعمال العلميين الذين كانوا يعملون على هذه البرامج. لم تكن الحواســب موجــودة عندئذ، ولكن سيأتي مفهوم الحواسب ثم تحقيقها كنتيجة لأفكار جون فون نيو مــان ونوربرت فينر. مثلاً لقد ألقى وينر محاضرة فى ١٤ فبراير ١٩٤٥ عــن "العقــل والآلات الحاسبة". وأنشأت مؤسسة توحيد العلوم فى عام ١٩٤٦، ولم يكــن هــذا التاريخ برئ. أولاً لقد ولد كل من جابور، ونيومان، ووينر فى بودابست وهربــوا من الحكم النازى.

بالإضافة إلى ذلك، فإن برنامج المؤسسة مدين بالكثير للاكتشافات التى تمت فى الإدارة العلمية، التى نتجت من الجهود الحربية. فمــثلاً أريــد بــوينر دراســة التأثيرات الرجعية والتوقع الإحصائى فى إطار المساعدة فى اتخاذ قرار فى مجــال العمل بالبطاريات المضادة للطيران. كان يلزم تطوير قطــع المدفعيــة لمواجهــة القصف النازى، وأدت هذه الأعمال لكسب المعركة فى لندن.

نتيجة أخرى لجهود الحرب كانت فى البحث فى المشكلات التــى طرحتهــا الاتصالات والضوضاء على ظهر قاذفات قنابل الحلفاء. وقد كانت مؤسسة توحيــد العلوم ستستمر فى هذه الجهود بشكل طبيعى ويشمل برنامج الأبحاث فــى مجــال الاتصالات الموضوعات الآتية: الإرسال، والإشارة، والمعلومــة، وقنــاة النقــل،

والدائرة، والشبكة، والتعرف reconnaissance، والضوضاء. هذه القائمة تخص أيضًا المشكلات التى لعبت فيها المويجات دورًا أساسيًا.

اكتشاف المويجات "زمن- مقياس" temps-échelle لجون مورليه Jean Morlet

لقد رأت المويجات النور بفضل آلة تصوير، ومنظومة. ولقد لعبا دورًا أساسيًا شبيه بالذى لعبته مؤسسة توحيد العلوم الذى ذكرناه مسبقًا. وتُعد المنظومة هو معمل مركز الفيزياء النظرية بـ Marseille-Luminy الواقع قرب الخلجان الصخرية التابع لـ CNRS المركز القومى للأبحاث العلمية فى فرنسا. لقد استخدمت ماكينة التصوير (التى كان يجب أن تحصل على جائزة من CNRS) من جانب الباحثين فى كل من قسمى الرياضيات والفيزياء النظرية فى كلية الهندسة École Polytechnique . كان جان لاسكو Jean Lascoux الفيزيائى ذو الثقافة الكونية يصور كل ما يراه يستحق النشر، وبدلاً من أن أبدى التذمر وعدم الصبر لاستخداماته الشخصية المفرطة لهذا الجهاز الجماعى، كنت أحب أن أنتظره وأن أناقشه. فى سبتمبر ١٩٨٤ كان يسألنى عما فعلته أثناء الإجازة، وبعدما أجبته أدرك أن العمل الذى ينسخه قد يهمنى. لقد كان مستندًا مكونًا من بعض الصفحات التى كتبها كل من أليكس جروسمان Alex Grossman وهو فيزيائى متخصص فى ميكانيكا الكم، وجون مورليه Jean Morlet وهو مهندس ذو رؤية مستقبلية كان يعمل لدى إلف - أكيتن Elf-aquitaine. فارتدت أول قطار متجهًا لمرسيليا لمقابلة جروسمان فى مركز الفيزياء النظرية فى لومينى، وهكذا بدأ كل شىء وولدت المويجات.

وكانت البرامج العلمية للمؤتمرات الأولى التى جرت فى لومينى، على المويجات، بالقرب من الخلجان الصخرية، طموحة مثل برامج مؤسسة توحيد العلوم. لقد وضعنا جهاز تحليل حديث، قادرًا على الغوص فى قلب الإشارات

الانتقالية واكتشاف تعقيدها. إننا نفكر هنا فى النقاط النغمة فى بعض مـن الميللـى ثانية حيث نبحث عن الصوت، بمعنى كل ما يهرب من تحليـل فورييـه (كـذلك المويجات "زمن-تردد"). لقد استخدم هذا الجهاز لتحليل كهربـة المـخ، وكهربـة القلب، والإشارات الصوتية وكنا نأمل اكتشاف ما لم يره من قبل أحد. لقد ناقـشنا خلال هذه المؤتمرات الأولى، الأطباء والموسيقيين والفيزيائيين والمهندسين، وأعدنا خلق مناخ سنوات الأربعينيات، دون أن نقصد تقليد مؤسسة توحيد العلوم (التى كنا نجهل وجودها أصلاً).

كنا نفكر فى عمل تقدم علمى حاسم بإقرار مناخ ملائـم لتفاعـل المـذاهب المتعددة والتخصيب المتبادل. لم نكن نقصد بالتخـصيب المتبـادل، البحـث عـن مستوى فقير بسيط، مبهم وغير دقيق للاتصال بين العلوم. على العكس من ذلك كنا نطمح لحركة ثقافية تعمل على الإثراء المتبادل لمختلف المواضيع العلمية. بإعـادة قراءة فعاليات هذه المؤتمرات يمكن لمس مدى سذاجتنا، حيث كنا نفكر أن اللعبـة الجديدة التى وضعناها يمكن أن تحل مشكلات عديـدة واليـوم أصـبحت قائمـة المشكلات المحلولة عن طريق هذه الآلة أكثر قصرًا.

فإحدى المشكلات التى تم حلها يخص معالجة الصور، وتعتبـر المويجـات الحديثة أصل المقاييس الحديثة لضغط الصور الثابتـة (JPEG -٢٠٠٠). يتـداخل معلم (بارامتر) القياس مع بارامتر التردد فى بناء هذه المويجات. واحـدة عكـس الأخرى مما يفسر النجاح الذى لقيناه فى معالجة الصور حيث كان هـذا القـانون أساسيًا.

إذا ما قارنا المناخ المحموم الذى واكب نشأة المويجات بذلك الذى صـاحب إنشاء مؤسسة توحيد العلوم، فمن الملائم أن نكون متواضعين ونشير إلى أن أعمالنا كانت أقل ثورية، والآن يمكن النظر إلى اكتشاف المويجات (زمن-تردد) كملحوظة صغيرة لتصحيح خطأ جابور وفون نيومان، فاستخدام المويجات (زمـن-مقيـاس) كان يعتبر مغامرة شاذة لم ترتكز على تجربة مقبولة فى مجتمع معالجة الإشارات.

وحتمًا لا يعتبر تحليل إشارة أحادية البعد بمقارنة نسخ مختلفة وضعت على مقاييس مختلفة لا يعتبر خطوة حدسية.

بالمقابل ففيما يخص الصورة، تعتبر هذه الخطوة نفسها مشروعة، وقد اعتدنا على كتابة أن عكس المقياس échelle هو التردد. أضف إلى ذلك أننا يجب أن نعلم، بعيدًا عن أعمال مورليه، أن عمل ديفيد مار David Marr في سياق مختلف تمامًا واكتشف المويجات (زمن–مقياس). فمعالجة الصور وما يرتبط به من رؤية بشرية ورؤية صناعية لا تشكل جزئًا من برنامج مؤسسة توحيد العلوم ولقد خصص مار السنوات العشر الأخيرة من حياته في محاولة فهم هذه المشكلات.

عمل مار كأستاذ فى كامبريدج (المملكة المتحدة) ثم التحق بمعهد ماساشوستMIT ليعمل ضمن فريق على الرؤية الصناعية التى تعتبر مسألة حاسمة فى الروبوتية. فعليه أن يمهد لقرارات بدءًا من معطيات توفرها كاميرا مجهز بها الروبوت. لقد اعتقد المهندسون ببراءة أن المشكلات ستحل بزيادة عدد المراقبين، ولكن استطاع مار أن يثبت أن الرؤية هى عملية فكرية مركبة قائمة على الخوارزمات ويستلزم تشغيلها علم جديد.

إن كتابه بعنوان *الرؤية، أبحاث حاسوبية فى التمثل البشرى ومعالجة المعلومة المرئية*.

Vision, A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information

هو حقًا كتابه الأخير لقد كتبه فى شهوره الأخيرة لمقاومة مرض اللوكيميا. "لقد أئتمنا مار على برنامجه العلمي وخاطبنا كما لو كان يخاطب صديقه. وتعرض لمويجات مورليه وأنجز لها عرضًا تحليليًا دقيقًا وتنبأ بالدور الذى ستلعبه فى معالجة الصور. هذا الجزء من العمل الذى أنجزه ديفيد مار سيعيد تناوله ويعدله ستيفان مالات Stéphane Mallat".(٢٢)

---

(٢٢)الكلام على لسان الكاتب ايف ماير.

لقد حلت المويجات التى اخترعها ديفيد مار وجون مورليه محل FFT (fast transform Fourrier) تحويلات فوربيه السريعة وذلك فى معالجة الصور. ولكن لزم لذلك خوارزمات سريعة تساعد فى عمليات التحليل والتركيب. لقد اشتهر كل من دوبيشى Ingrid Daubechies وستيفان مالات Stéphane Mallat لاكتشافهما هذه الخوارزمات التى تلعب دورًا مهمًا فى مشكلات الضغط والفصل compression et débruitage.

وتغطى تطبيقات المويجات (زمن-مقياس) مجالات متنوعة جدًا، وقد ذكر **مالات** فى حديث له فى جريدة لوموند الفرنسية بتاريخ الخميس ٢٥ مايو ٢٠٠٠، المعايير الحديثة لضغط الصور الثابتة، وصور الأقمار الصناعية والإنترنت...إلخ.

يعد فصل الصوت والصورة من الإنجازات الكبيرة التى نجحت فى تحقيقها المويجات. ويمكن شرح ذلك فيما يلى.

تتقاسم المويجات مع اللغة سهولة الاستخدام والخلق مما يفسر نجاحها، تعنى هذه السهولة أننا يمكن أن نغير بشكل اختيارى ترتيب العبارات دون تغيير معنى ما نكتبه. وبلغة الرياضيين يمكن أن نقول إن المويجات تشكل قاعدة غير مشروطة base inconditionnelle.

يرتبط ذلك بأعمال اثنين من المحللين الذين أحب أن أذكرهم. إنهما البرتو كالديرون Alberto Calderon وأنتونى زيجموند Antoni Zygmund، لقد أحيت اكتشافات ألبرت كوهين فى معاملات مويجات الدوال ذات المتغير المحدد أعمال كالديرون وزيجموند، وهو اكتشاف يؤسس لاستخدام المويجات فى ضغط وفصل الصور الثابتة. ويعتبر تطبيق المويجات فى مجال الإحصاء أحد نجاحات هذه النظرية. ولقد كان استبعاد الضوضاء من الصوت أحد الهواجس التى أرقت الرواد فى ١٩٤٥ وأصبحت الآن حقيقة علمية بفضل أعمال ديفيد دونوهو David Donoho ومجموعته.

كما أشرنا من قبل، فإن المويجات لها علاقة خاصة بمعالجة الصور. فمثلاً المقاييس الحديثة لضغط الصور الثابتة JPEG-2000 الشهيرة، قائمة على تحليل بالمويجات مما يقودنا للحديث عن تحديات "الثورة الرقمية". لقد غزت الثورة الرقمية حياتنا اليومية حيث إنها تطور أعمالنا، وعلاقاتنا بالآخرين، وكذلك إدراكنا للصوت والصورة. فعندما نفتح مجلة فاحتمال كبير أن نجد دعاية عن كاميرا رقمية؛ إنها إعلانات مصنوعة جيدًا وتزودنا بتعريف أول لغاية الثورة الرقمية: إمكانية الفعل، والتدخل فى الصوت والصورة (التسجيلات الصوتية، والصور الفوتوغرافية، أو الأفلام فى حالة الكاميرا الرقمية) وتداولهم وتحسينهم. يعتبر صوت دولبى الرقمى الذى يصاحب معظم الأفلام المعاصرة، ناتج مباشرة للثورة الرقمية. ونضرب بعض الأمثلة الأخرى لها أولاً التليفون اليوم أصبح رقمى. رقمى (ديجيتال) هو المقابل لتناظرى (أنالوج). يمكن للتبسيط مقارنة النسخة الأنالوج بطبعة محفورة بماء الفضة بمساعدة شريحة نحاسية منحوتة بجهاز للنحت. نذكر أيضا الإسطوانة ذات الثلمة. فى حالة التليفون فإن نسخ الصوت يتم عن طريق تيار كهربى تعمل اهتزازاته على إعادة إنتاج الاهتزازات الصوتية نفسها المنبعثة من المتكلم. لقد كان ثمن نقل الإشارة الكهربية لمسافات طويلة هو تغير فى الصوت يحدث بسبب قوانين الفيزياء. وكان ينتج عن ذلك تذبذبات grésillement تخبرنا عن المسافة التى قطعها التيار الكهربى، ولكنها كانت غير مستحبة بالمرة. فى المقابل فإن الصوت الرقمى غير قابل للتغير مثل الإسطوانة المدمجة التى لا تبلى.

يبقى أن نعرف كيف يتحول الصوت الرقمى إلى أنالوج (تناظرى). إن الصوت الرقمى هو مثال لترقيم معلومة أنالوج، وأن نرقم يعنى أننا نستطيع عمل كود للاهتزازات الصوتية (التى تكون إشارة مستمرة) وذلك عن طريق متتابعات طويلة من الأصفار والآحاد. وتتم عملية التكويد فى مرحلتين. المرحلة الأولى هى انتقاء العينة échantillonnage وهى عبارة عن قراءة لا نحتفظ منها إلا بنقطة

واحدة على عشرة. مبدئيًا دون وجود فرضية بشأن الإشارة المستمرة. لا يمكن أن نسعد بهذه القراءة السريعة. كما سبق أن أشرنا فى الجزء السابق فإن كلود شانون حل هذه المسألة على المستوى النظرى، ولكن ما زالت هذه "القراءة السريعة" تزودنا بحجم كبير جدًا لنتمكن من تدويره فى" مسارات المعلومات" دون صعوبة.

فيجب إذن "الضغط" comprimer وهذا التحدى الجديد يمكن مقارنته بملأ حقيبة بأفضل طريقة للملأ ليلة السفر. وتظهر مشكلة كتابة برامج أو أكواد لعملية الضغط وفهم أهمية عمل مقارنة بين مختلف الأكواد. إن فى عملية الاختيار تلك تدخل المويجات فى اللعبة.

مثال آخر للثورة الرقمية هو الإسطوانة المدمجة الصوتية compact audio disque التى ظهرت فى عام ١٩٨٢. فى خلال أربع سنوات أطاحت بالإسطوانة ذات الثلمة microsillon disque المصنوعة من الفينيل. تلت الاسطوانة المدمجة الصوتية السى دى روم CD-ROM الذى قلب الموازين فى استخدام الملتيدميديا أو الوسائط المتعددة. أصبح من الآن فصاعدًا من الممكن تسجيل الصوت والصورة على الدعامة (الإسطوانة) نفسها، واليوم تلاقى إسطوانة الدى فى دى (Digital Versatile Disc) DVD نجاحًا ساحقًا، على الرغم من الصراع المدمر لحامية معامل أبحاث طومسون Thomson، فإن الصورة الرقمية تغزو التليفزيون المعاصر.

هناك تطبيقات أخرى تطبق حاليًا أو متوقعة قريبًا وتخص التصوير الطبى، (عمل أرشيف لصور أورام الثدى mammographies الذى سوف يستخدم خوارزمات الضغط الرقمى، القائمة على المويجات)، وصور الأقمار الصناعية، والصور الآتية من التلسكوب هابل، إلخ. ومن المفهوم أن الوسائط المتعددة، والشبكة العنكبوتية تعتبر منتجات مباشرة للثورة الرقمية.

بالنسبة للجمهور الكبير، فإن الثورة الرقمية تبدو كجزء من التكنولوجيات الأكثر حداثة، ولكن بالنظر إلى تاريخها نرى أنها كانت بمعنى ما أحد مُركبات البرنامج العلمى لمؤسسة توحيد العلوم.

ختام

والآن نستطيع أن نجاوب عن الأسئلة التى طرحت فى المقدمة:

وليست المويجات اختراع عملى مثل العجلة، ولكنها تعد جزءًا مما نطلق عليه اليوم البرمجيات (logiciel أو software). لقد أصبحت المويجات اليوم أداة. و"المويجات كأداة" من المتوقع أن يحل محلها أداة أكثر سهولة فى التناول فى السنوات المقبلة. لن تلغى هذه الأداة يومًا. أضف إلى ذلك أن أداة المويجات هى فى الحقيقة صندوق أدوات، تضم أدوات مختلفة جدًا. بالإضافة إلى أن هذا الصندوق يتم إثراؤه باستمرار.

لقد بدأت المويجات كنظرية، لكنها لم تعد كذلك اليوم، حيث توقفت الأبحاث النظرية على المويجات. وفى خلال ستة أعوام ١٩٩٠-١٩٨٤ نجح كلاً من رونالد كوافمان، وإنجريد دوبشى، وستيفان ماليه وأنا نفسى فى توحيد خطوط للبحث آتية من مذاهب مختلفة جدًا: المقصود هنا أعمال تؤدى لمعالجة الإشارة باسم تشفير بالنطاق-الجزئى sous-bande؛ حيث إنها إحدى طرائق الفيزياء الرياضية المسماة "حالات متسقة" sétats coherent كما عمل جابور وشانون فى إطار مؤسسة توحيد العلوم؛ للتوصل فى النهاية لتقنية حساب تستخدم عالميًا، وهى تقنية القواعد المتعامدة orthonormées bases. لقد قادتنا هذه الأبحاث لكتابة العديد من برامج الحاسب المستخدمة فى تكنولوجيا معالجة الإشارات والصور.

وكان هذا التوحيد بمثابة نجاح كبير، ولكن كان له أيضًا آثار سلبية كثيرة. لقد ساقنا لاعتقاد شبه دينى بالنسبة لملاءمة الطرائق القائمة على التحليل بالمويجات، فهناك استخدام غير مناسب للمويجات، ولكنه ليس خاص بالمويجات. كما سبق أن لاحظنا فى لنتائج كل المغامرات الفكرية الكبرى.

هناك بعض الأدوات الفكرية التى يمكن أن تلاءم كل العلوم، دون أن تفقد دقتها. نذكر على سبيل المثال السرعة، والعجلة، والتردد... إلخ. لا يعتمد معنى

هذه الكلمات على السياق. فإن المويجات يمكن أن تمثل جزءًا من هـــذه القائمـــة. بالفعل مثل حالة تحليل فورييه فإن التحليل عن طريق المويجات، لا يخطـــئ أبـــدًا ولكن يفقد الملائمة. هذه الحقيقة الكونية تتكون من مجموعة من النتائج الرياضـــية الذاتية والدقيقة، وتنطبق هذه النتائج مبدئيًا على كل الإشارات، أيًا كـــان مـــصدرها الفيزيائي، وأن هذا التطبيق غير ملائم.

إن دراستنا التاريخية علمتنا أن التحليل بالمويجات له جذور تاريخية عميقة، وهو ثمرة تطور طويل. هذا السياق التطوري سوف يستمر، حتـــى لـــو توقفـــت المويجات عن أن تكون آخر صيحة (الموضة)؛ لأن المشكلات التي نحاول حلهـــا اليوم عن طريق المويجات ستكون موجودة دائمًا.

المراجع:

À mon avis, les quatre meilleurs ouvrages sur les ondelettes sont :
– COHEN (A.) et RYAN (R.), *Wavelets and multiscale signal processing*, Chapman & Hall ed., 1995.
– DAUBECHIES (I.), *Ten lectures on wavelets*, SIAM, Philadelphia, 1992.
– MALLAT (S.), *A wavelet tour of signal processing*, Acad. Press, 1998.
– VETTERLI (M.) et KOVACEVIC (K.-J.), *Wavelets and subband coding*, Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, NJ 07632, 1995.
Le lecteur plus orienté vers les mathématiques pourra consulter en version anglaise (refondue et mise à jour) ou en version française :
– MEYER (Y.), *Wavelets and Operators*, Cambridge University Press, 1992.
– MEYER (Y.), *Ondelettes et Opérateurs*, Hermann, 1990.
et enfin nous recommandons la lecture du merveilleux (mais contesté) ouvrage :
– MARR (D.), *Vision, A Computational Investigation into the Human Representation of Visual Information*, W. H. Freeman, 1982.

نظرية العُقد[٢٣]

بقلم إيفا باير

Eva BAYER

ترجمة: مها قابيل

إن العُقدة هى إحدى العناصر الرياضية الأكثر مادية، والأكثر سـهولة فـى شرحها لغير المتخصصين، مثلاً لنأخذ خيط ونعقده ونثبت الطـرفين سـويًا مـن نحصل على عقدة. ويفترض فى الخيط أن يكون مرنًا وقابل للتمدد، فكـل تحـول مستمر لا يقطع الخيط مقبول؛ أى أنه لا يغير العُقدة.

على الرغم من سهولة التعريف، فإن العُقدة ممكن أن تكون مادة معقدة جدًا، هذا يكفى لشرح جاذبيتها للرياضيين. ومما يعتبر أقل بداهة الاهتمام الكبير بالعقـدة من جانب الفيزيائيين، والكيميائيين وعلماء الأحياء (البيولوجيين)، هكذا الحال منـذ منتصف القرن التاسع عشر ولا يزال هو الحال اليوم.

تطورت نظرية العُقد بسبب منظور التطبيقات (فـى الفيزيـاء، والكيميـاء، والبيولوجى)،مثل كثير من الموضوعات الرياضية، ولأسباب داخلية فى الرياضة. مثلما يحدث فى كثير من الأحوال فإن الأخيرة كانت محددة أكثر من الأوائل، دون أن نقلل من شأن فائدة وأهمية تطبيقات نظرية العقد سيهتم الرياضيون بالعُقد حتـى لو كانوا يفكرون أنها بلا فائدة خارج الرياضة، فكثير مـن الرياضـيين انجـذبوا لجمال هذه المواد، المجسمة والمعقدة، وكذلك بالتحدى الذى تمثله صعوبة تـصنيف وحل بعض المسائل البسيطة فى صياغتها ولكنها صعبة فى حلها، وبعض المسائل موضوعة منذ أكثر من مائة عام تم حلها مؤخرًا، وأخرى ما زالت مفتوحة. وهـذه التطورات تحدث دائمًا بشكل غير متوقع ومبنى على أفكار يمكن أن تكون آتية من

(٢٣)نص المحاضرة رقم ١٧١ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٩ يونيو ٢٠٠٠.

موضوعات رياضية (أو فيزيائية) لا نشك أن لديها علاقة بالعُقد كل هذا يجعل من نظرية العُقد مذهبًا نشطًا جدًا، مفتوحًا على التفاعلات، والتى تحتفظ لنا بـلا شـك بمزيد من المفاجآت.

البدايات: فاندرموند، وجاوس، وتيه

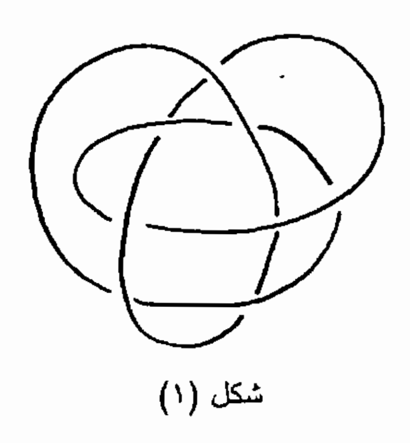
لقد أشار ألكسندر – تيوفيل فاندر موند Alexandre- Téophile Vandermonde إلى العُقد منذ عام ١٧٧١ فى مذكراته "ملحوظات على مشكلات الوضع"(٢٤)، وجاء بعده الألمانى كارل فريدريش جاوس Carl Friedrich Gauss (١٧٧٧–١٨٥٥) وهو أول رياضى يهتم بالعُقد فمما سجله، تُعد الأكثر قدمًا، نجد نبذة عن العُقد، ثم خصص مقالين للعُقد حديثًا ١٨٣٣ يُعرف عـدد (التـشابكات أو الجدلات) لعقدتين يسمى هذا العـدد اليـوم "لا متغيـر توبولـوجى" (invariant topologique): إنه لا يتوقف على طول أو كبر أو زاوية ولكن على وضع نـسبى. فى ١٨٣٣ لم تكن كلمه توبولوجى موجودة. ولكن كان الحديث عن geometria situs أو وضع هندسى، ولم يكن واضحًا البتة ماذا يغطى هذا الموضوع فى مدوناته فـى ١٨٣٣، ذكر جاوس أن دراسة اللا متغير الذى انتهى من تعريفه ستكون واحدة من مهام الهندسة الوضعية Geometria situs المهمة (Hauptaufgabe).

لتمثيل العُقد على مستوى نستخدم "رسم تخطيطى للعُقد". ونبدأ مـن مـسقط للعقدة على المستوى ونميز الممر العلوى من الممر السفلى (شـكل ١) إنـه أمـر طبيعى ومفيد جدًا فحص العُقد ذات المركبات المتعددة والمسماة ضفيرة. إنها تمثّل أيضًا برسوم تخطيطية. ويعتبر مقال جاوس الثانى عن العُقد (والضفائر) ذو طبيعة تركيبية، ويصف طريقه لعمل شفرة للرسوم التخطيطية لكل منهم، وتعتبر طريقـة جاوس أساسية فى هذا المجال.

---

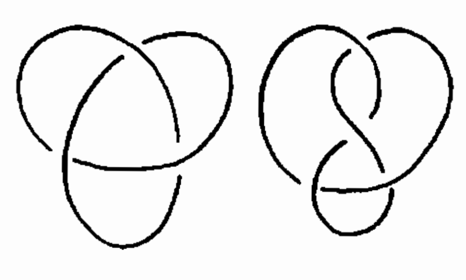
(٢٤) Vandermonde (A.T) "Remarque sur les problème de situation", Memoires de l'Academie Royales des Sciences , Paris (1771).p.566-574.

وأول من نزع لعمل تصنيف منظم للعُقد هـو بيتـر جـوفرى تيـه Peter Guthrie Tait (١٨٣١-١٩٠١). متأثرًا بنظرية اللـورد كلفـين Lord Kelvin، والتى من خلالها تعتبر الذرات عُقد فى الأثير، لقد قرر تيه أن نظرية العُقد أساسية فى دراسة الفيزياء وكرس لها الثلاثين عامًا الأخيرة من حياته. لقد عـرف عـدة مفاهيم مازالت مستخدمة إلى الآن. وقبل كل شىء أدخل "قياس التركيب" للعقـدة. والأكثر أهمية فى كل ذلك هو "عدد تقاطعات" عُقدة يعرف على أنه أصغر عـددًا من التقاطعات لرسم تخطيطى يمثل عُقدة، وإذا كانت N عقدة، سنسمى مجمـوع N عدد التقاطعات ونقول عُقد تافهة للدائرة غير المعقودة.



شكل (١)

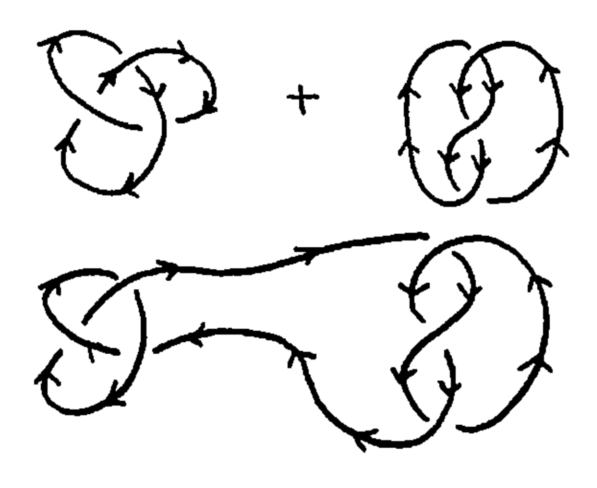
وعدد تقاطعات الدائرة التافهة هو الصفر العُقد غير التافهة الأكثـر بـساطة هى الـ trèfle



شكل (٢)

وعقدة الثمانية 8 (شكل ٢). عدد التقاطعات فى عقدة الترفل هى ٣، وفى عقدة الثمانية وهى ٤.

لقد عرف تيه أيضًا مفهوم الجمع للعقد (شكل ٣)، ولكى تكون هذه العملية معرفة تعريفًا جيدًا يجب أن "نوجه" العُقد التى نجمعها، بمعنى آخر نزودهم باتجاه للمسار. فإذا كانت N عقدة فإن مجموع N مع العُقدة التافهة هو N: العُقدة التافهة هى إذن عنصر محايد بالنسبة للعملية، وتسمى عُقدة قابلة للفك إذا استطعنا كتابتها فى شكل جمع عقدتين غير تافهتين. العُقدة غير التافهة وغير القابلة للفك تسمى "لا تُفك" أو "أولية" ولاحظ تيه بالتجربة أن كل عقده تفك بشكل وحيد كمجموع لعدد منتهى من العُقد الأولية، وهو ما لم يثبت إلا بعد وقت كبير على يد شوبرت Schubert [٢٥] ١٩٤٩. لم يكن لدى تيه الطرائق التوبولوجية اللازمة لذلك الإثبات.



شكل ٣

(٢٥) Schubert (H.), "Die eindeutige Zerlegbarkeit eines Knoten in Primknoten", Sitzungsber. Heidelberg. Akad. Wiss. Math. -Nat. Kl. (1949), n°3, 57-104

لقد نجح تيه مع شريكه كيركمان Kirkman فى ترقيم العُقد الأولية التى لها ٩ تقاطعات على الأكثر، ولقد ذكر العُقد غير الموجهة فى جداوله تلك ولا يميز بين عُقدة وصورتها فى المرآة. لقد اتبع هذا المبدأ، التابعون لتيه الذين رقموا العُقد حتى ١٣ تقاطعًا، ولا يوجد سوى عقدة وحيدة ذات ثلاثة تقاطعات هى الترفل. وعقدة وحيدة ذات أربعة تقاطعات وهى ٨ ويوجد ٤٩ عقدة بتسعة تقاطعات لكل منها(٢٦)، حسب أعمال ثيسلثويت thistelthwaite(٢٧) يوجد ٩،٩٨٨ عقده بـ ١٣ تقاطعًا.

لقد كانت أعمال **تيه** و**كيركمان** تجريبية (مبنية على الملاحظة والاختبار) لم يرتبا بأى شكل لإثبات أن اثنين من العُقد مختلفتان، ولا العُقد غير تافهة إلا فى بدايات القرن العشرين بفضل تقدم فى التوبولوجي أصبحت هذه الإثباتات ممكنة.

ولقد اهتم **تيه** قبل كل شيء بالعقد المتعاقبة بمعنى التى تُقبل بالرسم التخطيطى المتعاقب: ممر سفلى دائمًا ما يتبعه ممر علوى الرسم فى (الشكل ١) ليس متعاقب بالإضافة إلى أن العُقدة التى يمثلها ليست لها أى رسم تخطيطى متتالى، وإنه أحد الأمثلة الأكثر بساطة للعقدة غير المتعاقبة، فى الحقيقة إن كل العقد أقل من ٨ تقاطعات تكون متعاقبة، وكان لدى **تيه** عدة مبادئ لتصنيف العُقد المتتابعة. المقصود هنا الشروح التى كان متأكد من صحتها دون أن يستطيع إثباتها، نسميها اليوم فرضيات **تيه**، ولقد فكر مثلاً أن عدد التقاطعات جمعى أو بطريقة أخرى إذا كان N,N' عقدتين

فإن $C(N+N') = C(N) + C(N')$

(٢٦) Burde (G.), et H.Zieschang (H.), Knots, Berlin, de Gruyter, 1986.

(٢٧) Thistelthwaite (M.-B), "Knot tabulations and Related Topics", in Aspects of topology James (I.-M) et Kronheimer (E.-M), eds., Cambridge University Press, (1985), p.1-76.

وهذا ما تم إثباته فى عام ١٩٨٧ على يد كوفمان Kauffman وميراسوجى Murasugi وثيستلثويت Thistlethwaite بالنسبة للعُقد المتعاقبة.[٢٨] ولازلنا لا نعرف إذا كانت هذه المعادلة صحيحة في حالة العُقد غير المتتابعة.

النظريه التركيبية للعُقد:

عمليات ريدمستر

لقد عرفت العُقد انطلاقة جديدة فى بداية القرن العشرين، تحديدًا بفضل طرائق التوبولوجى الحديثة: زمرة بوانكاريه groupede Poincaré (المعروفة بالزمرة الأساسية) وزمرة التماثل... إلخ. مما سمح بتحقيق تقدم كبير. ويستطيع القارئ المهتم أن يرجع مثلاً لأعمال بيورد Burde، زيشانج[٢٩] Zieschang، كراول Crowell وفوكس Fox [٣٠] وفوكس[٣١]

فى الوقت نفسه حدث تقدم على صعيد آخر من البحث: النظرية التركيبية للعُقد "فإن إحدى المشكلات الرئيسية تكون كالتالى: بوجود زوج من الرسوم التخطيطية D1 ,D2، كيف نعرف إذا كان العُقد التى يمثلونها هى نفسها أم لا ؟. لقد قدم كورت ريديمستر حلاً لهذه المشكلة؛ حيث فعرّف ثلاث عمليات على الرسم التخطيطى للعقدة تسمى "حركات ردميستر"، وتعنى تعديل جزءًا من الرسم التخطيطى مع ترك الباقى كما هو. هذه العمليات الثلاث لا تغير من العُقدة، حيث إن الأولى معنية بإظهار (إخفاء) حلقه صغيرة، والثانية تهتم بظهور (إخفاء) زوج من التقاطعات التوأمية، والثالثة تهتم بمرور فرع فوق تقاطع (شكل ٤).

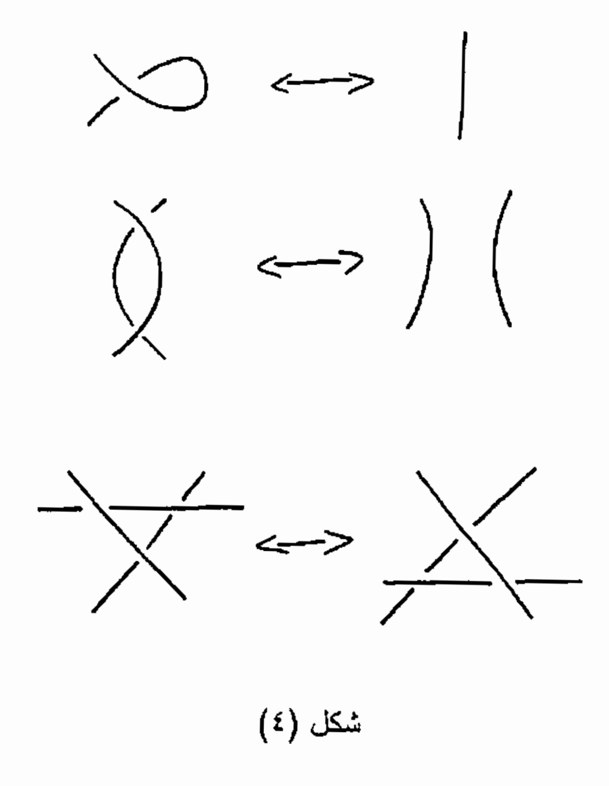
---

(٢٨) Murasugi (K.) "The Jones Polynomials and Classical Conjectures in Knot Theory". Topology 26 (1987) , 187-194. 28

(٢٩) Murasugi (K.) "The Jones Polynomials and Classical Conjectures in Knot Theory " II 29 .,Math. Proc. Cambridge Phil. Soc. 102 (1987) ,317-318 .

(٣٠) Op. cit 30

(٣١) Fox (R.-H.) , "A Quick Trip through Knot Theory ", in Topology of 3-manifolds and related topics , Prentice- Hall(1962), 120-167. 31



شكل (٤)

وبالعكس استطاع ريدمستر[٣٢] Reidmeister أن يثبت أن زوج من الرسوم التخطيطية يُعرفا العقدة نفسها إذا كان يمكن المرور من الواحد إلى الأخـر بعمـل عدد منتهى من المرات للعمليات المعرفة بعاليه". للأسف فإننا لا نعرف كـم مـرة يجب عمل هذه العمليات.

هذه النتيجة مهمة على كل حال كما سنرى.

---

(٣٢) Reidemeister(K.),KnotTheory ,Chelsa, New York , 1984.

لقد استخدم الرياضيون "اللا متغيرات" لطرح مشكلات التصنيف. لا متغيرات العُقدة التى تُعد شيئًا لا يتوقف سوى على العُقدة، وليس على الطريقة التى نقدم بها العُقدة. ومثال على ذلك قياسات التعقيد التى وضعها تيه كذلك عدد التقاطعات للعقدة يعتبر لا متغير، ويوجد العديد من الثوابت التى نحصل عليها بفضل التوبولوجى الجبرية: وهى زمرة العُقدة (الزمرة الأصلية للمكمل)، زمر التماثلgroupe d'homologie، الأشكال الرباعية formes quadratiques والمغلقة Hermitiennes... إلخ. ولن نتحدث هنا سوى عن اللا متغيرات التى يمكن أن توصف بفضل "أى رسم تخطيطى للعقدة" وتكون سهلة الحساب والمقارنة.

إن إحدى أبسط اللا متغيرات والتى عرَّفها فوكس كانت بفضل مفهوم الألوان الثلاثية tricolorabilité، ونقول عن الرسم التخطيطى للعقدة إنه قابل أن يكون ثلاثى الألوان إذا كنا نستطيع تلوينه باستخدام ثلاثة ألوان مع احترام القواعد الآتية، كل خيط يجب أن يكون بلون واحد فقط، وفى كل تقاطع تكون الألوان الثلاثة يجب أن ممثلة أو لون واحد فقط يكون ممثلاً. فى النهاية يجب أن نستخدم لونين من ثلاثة ألوان على الأقل لتلوين العُقدة.

نثبت أن خاصية القابلية للتلوين الثلاثى ثابت للعقدة: أو بقول أخر، لتكن كل الرسومات التخطيطية للعقدة قابلة للتلوين الثلاثى، أو كلها غير قابلة. لهذا الإثبات، نستخدم نظرية ريدميستر[٣٣] بالفعل يجب إثبات أن حركة ريدميستر لا تغير الخاصية القابلية للتلوين بثلاثة ألوان.

يسهل التحقق من أن عقدة الترفل ثلاثية الألوان، وعقدة الـ 8 ليست كذلك، والعُقدة التافهة ليست ثلاثية الألوان. وبذلك يمكن إثبات أن عقده الترفل ليست تافهة، وإنها تختلف عن عقده الـ 8، لأن اللا متغير مفيد لكنه ضعيف جدًا: إنه يقسم العُقد

---

(٣٣) Adams (C.), The Knot Book . Freeman ,1994.

لصنفين فقط. إحدى خطوات نظرية العُقد هو البحث عن لا متغيرات أكثـــر قـــدرة. الحالة المثالية هو إيجاد لا متغير كامل، أى لا متغير يسمح بتمييز كل العُقد.

لقد أخذت اللا متغيرات الكثيرة الحدود invariants Polinomiaux اهتمامًــا كبيرًا. أولها قد عرّفه جى- دبليو ألكسندر J.-W Alexander فى ١٩٢٨م[٣٤]. لــم تكن كثيرة حدود ألكسندر لا متغير كامل: مثلاً فهو لا يفرق بين عُقدة وصـــورتها فى المرآة. وكثيرة حدود ألكسندر للعقدة التافهة تساوى ١. يوجد أيضًا عُقــد غيـــر تافهة لكثيرة الحدود ألكسندر تساوى ١ إذن كثيرة الحدود هذه لا تسمح بتقريـــر إذا كانت عُقدة تافهة أم لا.

إنه لا متغير مفيد جدًا فى الوقت نفسه. ويسمح بتمييز معظم عُقــد جـــدول كيركمان وتيه. مثلاً يوجد الكثير من التعريفات لكثيـــرة الحـــدود هـــذه. بعـــضها تركيبية، وتسمح بحساب سريع لكثيرة الحدود بدءًا من رسم تخطيطـــى. وأخـــرى مبنية على مفاهيم دارجة عن التوبولوجى الجبرى، وتـــسمح بفهـــم هـــذه الفكـــرة بوضعها فى إطار أكثر عمومية.

كانت مفاجأة كبيرة اكتشاف لا متغير جديد كثير الحدود علـــى يـــد ف. ر. جونز V.R. Jones فى عام ١٩٨٤، وسبب ثورة حقيقية فى نظرية العقد. وكان أول تعريف لجونز مبنى على أفكار ناتجة من نظريـــة الجبـــر لفـــون نيومـــان Von Neuman، وجبرهيك Hecke ، وتبدو لأول وهلة معجزة[٣٥]، واليوم تم وضع عدة تعاريف بفضل أعمال كوفمان Kauffman وويتن Witten وجونز. بعكس كثيـــرة الحدود ألكسندر لم نجد تعريف توبولوجى. بالعكس كثيرة الحـــدود تلـــك مرتبطـــة

---

(٣٤) Alexander (J.-W) "Topological Invariants of Knots and Links". Tans. Amer. Math. Soc. 60 (1928), p.275-306.

(٣٥) Jones (V.-F.-R) "APolynomial Invariant of Knots via von Neumann Algebras", Bull. Amer. Math. Soc. 12 (1985), p.103-111.

Jones (V.-F.-R)."Hecke Algebra Representation of Braid Groups and Link Polynomials" Ann. of Math. 126 (1987) .p355-388

بمجالات رياضية وفيزيائية لم نكن نشك أن ممكن يكون لها أى علاقة بالعُقــد. إن فهم هذه الظواهر هو موضوع بحثى ما زال تحت التطوير. كثيرة الحــدود تلــك كانت أساس "فرضيَة تيه" فمثلاً عدد التقاطعات المتعاقبة لعقدة يقرأ بسهولة شــديدة بدءًا من كثيرة حدود جونز. سمحت إذن هذه الأداة الحديثة أن تحل مشكلات يرجع تاريخها لمائة عام.

من جانب آخر يوجد تعريف ذو طبيعة تركيبية يُظهر شبه كبير بين كثيرات حدود جونز وألكسندر، إنها نظرية "ثوابت رابطة خيوط" جونز. والتــى اخترعهــا جى كونواى T. Conway فى عام ١٩٦٩ إن علاقتها علاقة تــربط لا متغيــرات الضفائر n-,n+,no كل مرة تكون هذه الضفائر لا تختلف سوى فى تقــاطع واحــد مثل فى (الشكل ٥). بدقة أكثر إذا كان P ثابتًا ذا قيم فى حلقة A (فى معظم الوقت تكون حلقة فى كثيرة الحدود) نقول إن P تحقق علاقة الربطة إذا وجد $a_-, a_+ \in A$, a_0

بحيث $a_+P_{N+} + a_-P_{N-} + a_0P_{N0} = 0$

إن كثيرات حدود ألكسندر وجونز يحققان كل منهما هذه العلاقة.

يوجد أيضًا كثيرة حدود بمتغيــرين تــسمح بإيجــاد كــل مــابين كثيرتــى الحدود[٣٦]. هذه النظرية الجميلة لها حدود: لا يوجد ثابت للرابطة ليس ثابت كاملاً.

N_+ N_- N_0

شكل ٥

(٣٦) Harpe (P.de la), Kervaire (M.) et Weber (C.) op. cit.

إن عرض فاسيليف Vassilev الذى يعود تاريخه إلى عـــام ١٩٨٠م، أتـــى بتناول جديد لنظرية العُقد. إنها تمثل زوج من التجديدات الرئيـــسية. مـــن ناحيـــة بالإضافة إلى العُقد المعتادة، درس فاسيليف "عُقد مفردة" أى أن لديها نقط مزدوجة. من جهة أخرى تسمح نظريته بالطرائق إلى "كل" اللا متغيرات العددية للعقـــد فـــى الوقت نفسه، وإيجاد لا متغيرات كثيرات حدود سبق تعريفها.[٣٧] يظن كثيـــر مـــن المتخصصين أن فاســـيليف يسمح بتمييز كل العُقد، ولكن ذلك غير مبرهن حاليًـــا. لا يمكن القول أكثر من ذلك هنا ولكن يستطيع القارئ مراجعة أعمـــال فاســـيليف وفوجل Vogel، وكذلك العروض التى يمكن فهمها لغير المتخصـــصين مقـــالات سوسنكى[٣٨] Sossinsky.

كما رأينا من قبل فنحن نتصرف من خلال الكثير من الثوابت. إذا كـــان أى من ثوابت كثيرات الحدود المعروفة، يعتبر ثابتًا كاملاً، فإنه يوجد لا متغيرات أكثر رقيًا يمكن أن تكون كاملة، وشبه كاملة. بالفعل فـــإن جـــوردن Gordon ولـــوك Luecke أثبتا فى عام ١٩٨٩م، أن زمرة العُقد تعتبر لا متغير كامل بالنسبة للعُقـــد "الأولية". وهى نتيجة مهمة، لكنها لا تضع نهاية للأبحاث الجارية على العُقـــد ولا متغيراتها. إن زمرة العقدة موضوع معُقد، وسيكون من المهم إيجاد لا متغير كامل أكثر بساطة – مثلاً لا متغير كثيرة حدود.

---

(٣٧) Birman (J.) et Yin (X.-S), «Knot Polynomials and Vassilev Invariants», Invent. Math.111 (1993), P.253-287. 37

(٣٨) Vassilev (V.-A),"Cohomology of Knot spaces, Theory of singularity and its applications" (Arnold (V.-I),ed), Advances in Soviet Math.vol I, rev.ed. Amer.Math.Soc. Providence, RI, 1990, p.23-70.Vassilev (V.-AComplements of Discriminants of Smooth Maps, Topology and applications, rev. ed. Amer. Math.Soc.Providence ,RI,1994.

Vogel (P.) «Invariants de Vassilev des noeuds», Séminaire Bourbaki 1992/93, Astérisque 216, Exp. 769, 20p

Sossinky (A), «Les invariants de Vassilev», Pour la science, dossier hors- serie, avril 1997, p.82-85.

لقد كان جزءًا من الدافع لدراسة العُقد فى القرن التاسع عشر آتى من آفــاق التطبيقات فى علوم أخرى إنه كذلك الحال اليوم. فالروابط مع الفيزياء متعــددة.(٣٩) فنظرية العُقد تتدخل أيضًا مع الكيمياء والبيولوجى وذلك بطريقتين.من ناحية يعمل الكيميائيون على خلق جزيئات معقدة ومضفرة للحصول على مــواد حديثــة ذات خواص مهمة.(٤٠) نظرية دراسة العُقد مهمــة أيــضًا فــى دراســة طوبولــوجى (التضاريس الرياضية) الدنا DNA فى الخلية. على الــرغم مــن أن الــدنا DNA نادرًا ما يكون عُقدة فى الطبيعة ولكــن تتكــون العُقــد والــضفائر، فــى ســياق الاســتنساخ وإعــادة التركيب transcription et replication بعض الإنزيمــات المسماة topoisomerases، تغير توبولوجيــة الــدنا DNA.(٤١) يــشبه تــأثيرهم التحويلات التوبولوجية التى تتداخل فى علاقات الرابطة المستخدمة فــى حــساب بعض ثوابت كثيرات الحدود (شكل٥).

---

(٣٩) Kauffman (L.),Knots and Physics, World Scientific , 1991.

(٤٠) Sauvage (J.-P), "La topologie moléculaire", Pour la Science, dossier hors-série, avril 1997, p.112-118.

(٤١) Wang(j), «les enzymes qui modifient la topologie de l'ADN», Pour la Science dossier hors-série ,avril 997, p.120-129.

المراجع:

– BAR-NATHAN (D.), « On the Vassiliev Knot Invariants », *Topology 34*, p. 423-475.

– BIRMAN (J.), « Braids, Links and Mapping Class Groups », *Annals of Mathematics Studies 82*, Princeton University Press, 1976.

– CONWAY (J.-H.), « An Enumeration of Knots and Links », *Computational problems in abstract algebra* (ed. J. Leech), Pergamon Press (1969), p. 329-358.

– DUPLANTIER (B.), « Les polymères noués », *Pour la Science*, dossier hors-série, avril 1997, p. 119.

– GAUSS (C. F.), « Zur matematischen Theorie der electrodinamischen Wirkungen », manuscrit publié dans *Werke*, vol. 5, *Königl. Ges. Wiss. Göttingen*, (1877), 605.

– GORDON (C. McA), LUECKE (J.), « Knots are determined by their complements », *J. Amer. Math. Soc. 2* (1989), p. 371-415.

– JONES (V.-F.-R.), « Les nœuds en mécanique statistique », *Pour la Science*, dossier hors-série, avril 1997, p. 98-103.

– KAUFFMAN (L.), « On knots », *Annals of Mathematics Studies 115*, Princeton University Press, 1987.

– STASIAK (A.), « Nœuds idéaux et nœuds réels », *Pour la Science*, dossier hors-série, avril 1997, p. 106-111.

– TAIT (P.-G.), « On knots », I.II.III., Scientific Papers, Vol I. (1898), p. 273-347.

– WITTEN (E.), « Quantum field theory and the Jones polynomial », *Comm. Math. Phys. 121* (1989), p. 351-399.

فراغات وأعداد[٤٢][٤٣]

بقلم: جاك تيتس

Jaques TITS

ترجمة: مها قابيل

كل رياضي يجب أن يواجه في يوم ما السؤال "ألا يزال يوجد شيء آخر نفعله في الرياضيات؟ فيم يكمن النشاط الرياضي؟" للإجابة عن هذا النوع من الأسئلة، حدث مؤخرًا أثناء مؤتمر موجه لغير المتخصصين بأن تسلحت بالعدد الأخير من مجلة Mathematical Reviews إنها تنشر مقتطفات من كل الأعمال الرياضية التي ظهرت، وكانت كل كراسة شهرية تحمل من خمسين إلى مائة صفحة من الدرجة الربعة، وعندما بدأت أشترك فيها في نهاية الأربعينيات. وفي عام واحد وصل حجم المنشورات إلى حجم قاموس كبير، وفي السبعينيات أصبح مثل هذا الحجم مخصصًا للفهرس السنوي للمجلة، ومنذ ذلك الوقت تضخمت Mathematical Reviews مرة أخرى وأصبحت أعداد سنة واحدة تكفي لملأ حقيبتين كبيرتين جدًا.

تم اكتشاف هذا الكم الكبير من الأشياء الحديثة سنة وراء سنة في الرياضة، مما يجعل المرء يخشى أن هذا العالم سيصبح مثل برج بابل، فلا أحد يستطيع إدارة كل هذا الكم من المعلومات. والحقيقة غير ذلك بالمرة لحسن الحظ، فكثير من الرياضيين يبقون قريبين من التغيرات الكبيرة في مجالهم. وإذا جمعنا فريقًا منهم يأتون من آفاق مختلفة لن يلبثوا أن يكتشفوا الاهتمامات المشتركة بينهم.

---

(٤٢)نص المحاضرة رقم ١٧٢ التي ألقيت في إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٠ يونيو ٢٠٠٠.

(٤٣)نظرًا لضيق الوقت لم أتمكن من كتابة المحاضرة في الوقت الذي حدده المسئولون عن المشروع بحيث أعطيها الشكل الذي كنت أتمناه. النسخة التي نراها هنا قريبة جدًا من نص أعدته السيدة Juliette Roussel بناءًا على تسجيل للعرض الشفهي.

إن الجبر والهندسة اللذين أنوى التحدث عنهما جزء غير قليل من هذه الرياضيات الآخذة فى التمدد بما أن تواصلى معكم هنا، لن يكون سوى جزء صغير جدًّا من (كل المعارف) يسعدنى أن أقدم عرضًا سريعًا لبعض جوانب هذه المجالات التى تبدو لى مهمة.

الأصول

إن كلمة هندسة بالفرنسية géometrie تأتى من اليونانية geometria وتعنى أرض، وقياس، وتذكرنا بفكرة المساحة وتسمى أيضًا " géomètre expert" "هندسى خبير" الرجل الفنى الذى يهتم برفع المساحات والارتفاعات. إن علم الهندسة أكثر قدمًا من هذه الكلمة (géomètre كما وضعها الفرنسيون). وبعض البناءات الهندسية" فى مصر وحضارة ما بين النهرين يرجع تاريخها للألفية الثانية قبل الميلاد، والشكل الفلسفى والعلمى الصرف لهذا العلم يعود لروما القديمة: "لن يدخل أى شخص هنا إلا لو كان مهندسًا gèonètre" هذا القانون المكتوب على واجهة أكاديمية أفلاطون Platon، فتُفهم كلمة مهندس هنا بالمعنى الأكثر اتساعًا وهو الرياضى. ولقد احتفظ بهذا المعنى لفترة كبيرة؛ فهو المعنى الذى استخدمه باسكال Pascal عندما واجه الفكر الهندسى والفكر الراقى.

إن كلمه جبر algébre تأتى من العربية الجبر aljabr والتى تعنى إجبار أو إرغام واختصار وقد أُدرج هنا المعنى من عنوان كتاب للخوارزمى فى القرن التاسع، وفى اللغة الدارجة يقصد بالجبر الشىء غير المفهوم. "إنه جبر بالنسبة لى" وهى مرادف لكلمة "هذا صينى". وإذا تحدثنا بشكل جدى، عندما نتكلم عن الجبر، فإننا نفكر فى الحساب بالحروف، أو نستخدم الحروف للإشارة إلى مجاهيل فى الحساب الجبرى يرجع تاريخها إلى فييت Viète (١٦٠٣ - ١٥٠٤)". إنه فى الحقبة نفسها تقريبًا أو قبلها قليلاً ظهرت علامات الحساب (جمع +)، (طرح −)، (ضرب ×).a^b علامة الأس.

إن محتويات كلمتى جبر وهندسة قد اختلفت (كما هو مفهوم) بشكل كبير لكنها بقيت مخلصة لأصلها. فالأفكار الأولية للهندسة والجبر وما زالت حاضرة فى التركيب الضخم الذى أعطوه الميلاد (هى ضخمة لأن هذين المجالين يمثلان تقريبًا ربع الرياضيات أى حجم ضخم من المعلومات).

الجبهة ما بين الجبر والهندسة

لدينا إذن اثنان من العلوم الجيدة التأسيس بما أنهما استمرا على مر القرون أو الألفيات. فيتغيرهم غير متوقع على مر القرون، لأنهم يميلان إلى التقارب من بعضهما لدرجة أن يصلا إلى الاندماج أو الاختلاط بالنسبة لبعض المواضيع، ولا يوجد مسافة كبيرة بينهما يوجد فقط فرق صغير مرتبط بوجهات النظر المتبناة، ونستطيع أن نميز تناول هندسى وتناول جبرى للمسائل. إن مقالاً جيدًا يحمل دائمًا الشكلين، وعملية تبنى أى من وجهتى النظر هى مسألة استعداد ذاتى، فالبعض يكون هندسيين أكثر والبعض الآخر يغلب عليهم طابع الجبريين.

إن الرؤية المعاصرة لعامة الناس تجاه الجبر والهندسة هى دائمًا خاطئة، أو تم تجاوزها، للتبسيط فالمشتغل بالهندسة يقدم نفسه على أنه هو الذى يحل المشكلات، المشكلات الشهيرة (أو التطبيقات) الهندسية. حسب هذا المفهوم سيقوم الذين يمتهنون الهندسة بحل المشكلات الأكثر صعوبة شيئًا فشيئًا ولكن فى الإطار الثابت الذى تثبته مسلمات الهندسة الإقليدية. البعض يتخيل الهندسة كمذهب خطى تمامًا، بنظريات تتسلسل بعضها وراء بعض، وبهذه الطريقة يمكن أن نفهم جملاً مثل: "لقد توقفت فى الهندسة عند النظرية ١٢" أو "وصلت حتى حجم الكرة".

أما رجل الجبر فينظر إليه كشخص يحسب بالحروف، ويحل معادلات آخذه فى التعقيد شيئًا فشيئًا، من الدرجة الأولى والثانية والثالثة.

كذلك يتميز رجل الجبر ورجل الهندسة عن بقيه العلماء بكونهم يعملون فى إطار وتبعًا لقواعد ثابتة، ومن هنا يأتى السؤال "ماذا يوجد من جديد فى

الرياضيات"؟ بالمقابل فإنه منوط بالعلماء الآخرين أن يكتشفوا هم على الأقل أشياء وأهداف جديدة، وعليهم أن يدرسونها.

إن حقيقة الرياضة مختلفة تمامًا وهى تهتم أيضًا بأهداف حديثة يجب اكتشافها ودراستها. هذه الأهداف الرياضية أكثر تجريدًا من التى يهتم بها العلماء الآخرين، فى الوقت الذى تهتم العلوم الأخرى فى جوهرها هى أيضًا بدراسة كيانات مجردة. إن الفيزيائى يتحدث عن الإلكترون، فى حين أنه لدقة الكلام لا يوجد إلكترونات فى الحقيقة. إنه مجرد مفهوم، من المؤكد أن المفاهيم الرياضية أكثر تجريدًا، وتعطى للرياضيين حرية لا ينعم بها العلماء الآخرين، فيستطيع الرياضى بحرية ابتكار أهداف دراسته.

لا نريد هنا بالابتكار أو الاختراع هو اختراع أى شىء، فالمفاهيم التى يدخلها الرياضى يجب أن تكون ذات أهمية من وجهه نظر جموع الرياضيين وتطبيقاتهم، وهم عديدون. كنت أود أن أعطى مثالاً لشىء رياضى، وبالرجوع إلى الرؤية المبسطة، التى ذكرناها من قبل عن الجبريين، "حلالون المعادلات" منذ آبل Abel (١٨٢٩-١٨٠٢) وخاصة جالواه Galois (١٨٣٢-١٨١١) لم تعد المعادلة الجبرية فقط مشكله تبحث عن حل؛ لكى تصبح هدفًا يمكن دراسته. إن المعادلة لها خواص، وكثيرًا ما يحدث أن ندرسها دونما أن نسأل إن كان لها حلول، أو حتى لا نهتم بحلولها، عندما نعلم أن لها حلولاً. بطريقة أخرى يمكن القول إننا نهتم بخواص المعادلات أكثر من إمكانية حلها.

هناك نتيجة حديثة، تُذكر كثيرًا فى الصحف غير المتخصصة وتذهب فى الاتجاه المعاكس. إنها هنا قضية معادلات ليس لها حل. "النظرية" الأخيرة لفيرمات (حوالى ١٦٠٤) هى تأكيد قد أعلنه فيرمات:

"إذا كانت n عددًا صحيحًا n>٢، المعادلة.

$$x^n+y^n=z^n$$

ليس لها حلول حيث x,y,z أعداد صحيحة غير صفرية".

لقد كان فيرمات Fermat يكتب فى هوامش كتابه؛ حيث إنه ذكر فى هامش نسخته من كتاب (الحساب) لديوفونط Diophante، الخاصية الموجودة بأعلى، مشيرًا إلى أنه لم يكن لديه المكان الكافى لكتابة البرهان. إننا لا نعرف إن كان لديه حقيقة أى برهان، ولكن هذا لا يبدو بديهيًا. أيا كان، هذه النظرية أثبتها أ.ويلز A. Wiles فى ١٩٩٤، بعون من العديد من النتائج المساعدة التى كان قد كتبها كتاب[٤٤] أخرون.

أود جذب الأنظار للطريقة التى ذكرت بها هذه الخاصية؛ إذ إننى لم أقل "المعادلة $x^n+y^n = z^n$ ليس لها حل" لقد حددت "مع x,y,z أعدادًا صحيحة غير صفرية" إنه مهم جدًا فى الرياضيات تحديد كل الشروط التى نتحرك فيها، إما سنقع سريعًا فى قول أشياء خاطئة، وفى هذه الحالة يكون "المعادلة $x^n+y^n = z^n$ ليس لها حلول هى خطأ بما أن

$$1^3+1^3 = (\sqrt[3]{2})^3$$

ما يحدث هنا هو أن $\sqrt[3]{2}$ ليس عددًا صحيحًا. المقولة إذن خطأ إذا نسينا شرط أن.x,y,z صحيحة.

يقودنى هذا إلى ملحوظة أخرى. فلقد تحدثت عن رؤيتنا البسيطة للرياضيين، الذين ينحصر نشاطهم أساسًا فى عمل حسابات معدة جيدًا، أو عمل رسوم بيانية معقدة جدًا. فى حين أن الحاسب يقوم بهذه الأعمال بشكل فعال جدًا بالمقارنة بنا، ونستنتج أن الرياضيين أصبحوا بلا فائدة؛ لرؤية عدم منطقية هذه الفكرة، يكفى التفكير فى نظرية ويلز فأى حاسب سيكون قادرًا على برهنتها؟ لن نذكر سوى عقبة واحدة من ضمن أخريات، فلنقل إن حاسبًا بسيطًا له قدرة

(٤٤)يمكن للقارئ الاطلاع فى هذا الموضوع على المحاضرة ١٦٨ فى جامعة كل المعارف التى ألقاها Yves Hellegouarch.

محدودة، دون إسهام خارجى، لا يأخذ فى اعتباره الحقيقة النظرية التى نهتم بها هنا وهى الأعداد الصحيحة (أيًا كانت).

الموضوعات الرياضية

لقد سبق أن رأينا أنه ضمن موضوعات دراسة الجبريين يوجد معادلات من كل الأنواع مثلاً: معادلات جبرية، ولكنها تؤسس علاقات بين أشياء أكثر أولية بما يعنى "الأعداد". بطريقة أكثر بساطة يمكن استنتاج أن الموضوعات الأولية التى يهتم بها الجبريون هى الأعداد: إنهم يتحققون من أنها تتداخل دائمًا عن طريق غير مباشر مع نظام الأعداد.

وكذلك العاملون بالهندسة يدرسون الأشكال التى عادة ما تقع فى الفراغ بحيث إن موضوعات الدراسة الأولية للعامل بالهندسة هى الفراغات. إن خلق واكتشاف فراغات حديثة ذات استخدامات متعددة هو من الأنشطة الرئيسية للمشتغلين بالهندسة. كذلك يخلق الجبريون على الدوام نظم عددية حديثة، ويخلق المشتغلون بالهندسة فراغات حديثة لن أحاول فى هذه المحاضرة تعريف المفهومين، نظام الأعداد والفراغات بدقة، سأشير فقط إلى التحليل، لا يوجد أى فرق فى الأساس بينهما، ولكن فقط فى المحتوى الحدسى، مما يدعم الملحوظات المذكورة بأعلى عن الوحدة الأساسية بين الجبر والهندسة.

ونذكر أيضًا سريعًا أننا إذا رأينا الجبريين مثل الرياضيين يهتمون بالأعداد، ونظم الأعداد، فيجب أن نعد من ضمنهم علماء الحساب Arithmetician.

الأعداد

كنت قد اضطررت إلى ذكر نظم الأعداد كأهداف الدراسة المفضلة لدى الجبريين أكثر من الأعداد نفسها بالفعل، فنادرًا ما يكون عدد معزول هو موضوع الدراسة، ومع ذلك هذا يحدث أحيانًا كما سنرى.

مثال: ط = ٣,١٤١٥٩٢٦٥٣٥٨٩٧٩٣٢٣٨...

هذا العدد حسب التعريف هو ناتج قسمة طول الدائرة على قطرها، وهذا هو السبب الأول للاهتمام به عمليا، ولقد اهتم به التقنيون منذ فترة بعيدة كما اهتم بـه كل من الرياضيين (رياضة بحتة) والمشتغلين بالحساب والهندسة، وسنجد هنا تداخل فيما بين الجبر والهندسة.

إن أحدى الأشياء الأولى التى حاولنا عملها هو إعطاء قيمًا مقربة لـ ط فى شكل كسور، وقد كان أرشيمدس أول من قدر ط بـ 22/7، ولقد تخيل عملية هندسية تسمح له بالتقريب بكل الدقة التى يتمناها، ولاحظ أن

$$3+1/7 < \pi < 3+10/7$$

تقريب آخر مشهور وهو ٣٥٥/١١٣ والذى وضعه رياضى صينى هو زو شو نجزى Zu Chongzhi. فى نهاية القرن الخامس، ولقد اكتشفها الهولندى أنتونيز Anthonisz بعد ذلك بأحد عشر قرنًا، إن نظرية الكسور المستمرة تسمح بإظهار أن ٣٥٥/١١٣ هو القيمة المقربة على نحو رائع من ط.

وبعد وقت طويل طُرح السؤال النظرى الطبيعى البديهى: "هل يوجد خارج قسمة يكون عددًا صحيحًا؟ وهل يوجد كسر يكون كل حد منه عدد صحيح وخارج قسمته يساوى بالضبط ط ؟

بما أن عددًا ما هو خارج قسمته عددان صحيحان يسمى عددًا نسبيًا RATIONNEL هذا السؤال يعود ليسألنا إذا كان ط عدد نسبى؟(٤٥) لقد برهن

---

(٤٥) إن كلمة نسبى هنا يجب أن تؤخذ بمعناها الرياضى، فإن الرياضيات مكملة بألفاظ الحياة المزودة بمعانى إصلاحية ليست هى نفسها الموجودة باللغة، ولكن معناها المستخدم، بالنسبة للرياضى، للهدف الرياضى الذى يرمز إليه بـ (حقل CORPS، حلقة ANNEAUX، حزمة فئة مفتوحة FAISCEAUX، طيف FANTOME،) إن المفاهيم الرياضية صغيرة، وذات طبيعة متنوعة جدًا تمكن الرياضيون، مثل: الكيميائيين والبيولوجيين يختلقون مصطلحات متلاحمة أصلها لاتينى أو يونانى يمكن ذكر مفهوم أدخلته فى أعمالى وحاز على الاسم المزخرف IMAGE " عمارة " من قبل ن. بورباكى: أنه لا يعنى بالتأكيد مكان للسكن.

الرياضى الألمانى ج. لامبرت J.Lambert فى ١٧٦٦ أن ط ليس عددًا نسبيًا (البرهان الذى كان يمثل فجوة صغيرة، تم اكماله في عام ١٧٨٤ على يد لوجندر Legendre) بما أن ط ليس عددًا نسبيًا فهو ليس حلاً لمعادلة من النوع:

أ ط + ب = صفر

حيث أ، ب أعداد صحيحة: بشكل أخر يمكن القول إن المعادلة ذات المعاملات الصحيحة من الدرجة الأولى لا يمكن أن يكون ط حلاً لها. بشكل عام هل ط عدد جبرى؟ (نذكر هنا حلول معادلات كثيرات الحدود ذات المعاملات الصحيحة من أى درجة، أى ذات الشكل:

أ~صفر~ + أ~١~س + أ~٢~س ^٢^ +....+ أ~ن~ س ^ن^ = صفر

وتم إثبات أنها ليست كذلك: حيث لا يوجد معادلة ذات معاملات صحيحة لها حل العدد ط. خصوصًا ط ليست الجذر التربيعى للعدد ١٠ كما أكد الرياضى الذى عاش فى القرن السابع براهما جوبتا Brahmagupta، وإلا كان ليخضع لمعادلة كثيرة الحدود

ط ^٢^ – ١٠ = صفر

إن الحقيقة أن ط ليس عددًا جبريًا – نقول إنه "يسمو" – أثبتها ليندمان فى عام ١٨٨٢ Lindemann. المادة الثانوية التى نحصل عليها من هذا المنتج هو استحالة تربيع الدائرة، بشكل دقيقة فإن تربيع الدائرة غير ممكن مع الوسائل التى نستخدمها، بمعرفة المسطرة، والفرجار والبناءات الأولية للهندسة وهذا الزعم الراجع لليندمان يحل قطعيًا المشكلة المفضلة للباحثين الهواة منذ قرون.

الأعداد الأولية

هنا مثال أخر لأعداد، حتى لو أخذت على معزل، فإنها تمثل أهمية كبرى للرياضيين كما لمستخدمى الرياضيات، وهى "الأعداد الأولية". إن العدد الأولى هو

عدد صحيح لا يمكن تفكيكه إلى حاصل ضرب عددين صحيحين أكبر من الواحد. عندما كنت طفلاً، وكان أكبر عدد أولى معروفًا وقتها هو ١ – ٢^١٢٧. هـذا العـدد يحمل حوالى ٤٠ رقمًا. كان من الممكن تحديد إن كان هذا العدد أولـى أم لا فـى ذلك الوقت، ولكن لم يكن متخيل إعطاء طريقة عامة يمكن تطبيقها لأى عدد مكون من ٤٠ رقمًا لتحديد إن كان أولى أم لا. تسمح الحواسب الآن بحل هذه المـشكلات فى عدة ثوانى، لأعداد تصل إلى ٢٠٠٠ رقم (ألفى رقم). فى المقابل، فإن الأعـداد ذات العشرين ألف رقم تتعدى إمكانيات حسابات الحاسب.

وهناك مشكلة أخرى أصعب كثيرًا تتعلق أيضًا بالأعداد الأولية، وتكمن فـى إيجاد عددين أولين نعلم حاصل ضربهما (مسألة إيجاد عوامل Factorisation). إن الحواسب يمكن أن تعطينا الإجابة بالنسبة للأعداد الأولية الصغيرة، لكـن بالنـسبة لعددين أولين مكونين من ٢٠٠ رقم مثلاً، يكون حاصل ضربهم حـوالى ٤٠٠٠٠ رقم، تكون الحواسب غير قادرة، ليس الموضوع تسالى رياضيين ولكنه سؤال مهم جدًا فى CRYPTOLOGIE التشفير؛ لأن حاصل ضرب عددين أوليـين كبيـرين جدًا، يستخدم فى عمل أكواد للرسائل.[٤٦] نجد هنا إذن مسألة نظرية ميـره، تبـدو مفيدة عمليًا: – يمكن أن تكون مفيدة جدًا فى موضوع آخر بما أنها تـستخدم فـى تطبيقات عسكرية.

ولنعد للأعداد الأولية. إن هذه المتوالية من الأعداد:

٢،٣،٥،٧،١١،١٣،١٧،١٩،٢٣،٢٩،٣١،٣٧،٤١،... غير محـدودة وهنـا نتيجة قديمة جدًا، واحدة من أجمل النتائج الرياضية فى التاريخ القديم وهى ترجـع لإقليدس فـى القـرن الثالـث قبـل المـيلاد، ونرصـد الآن قـوانين متقاربـة ASYMPTOTIQUE تقدر قيمة العدد النونى من المتوالية موضع السؤال (العـدد الأولى النونى).

---

(٤٦) يمكن قراءة المحاضرة رقم ٢٥٢ من جامعة كل المعارف فى هذا الموضـوع نفـسه والتـى ألقاهـا Jacques Stern.

النظرية المذكورة "الأعداد الأولية"، التى تجلب مثل هذا التقدير، تم إثباتهـا فى نهاية القرن التاسع عشر على يد ج. هادامـارد J.Hadamard -١٨٩٦ وش. ف. دى لأفاليه بوسانCh. –V de Vallée – Poussin.١٨٩٩ إن قـانون حدسـى أكثر دقة كثيرًا هو موضوع الفرضية الشهيرة لريمانRiemann ١٨٥٩ والتى يعد إثباتها منذ ١٥٠ عامًا، واحدة من أكبر المشكلات غير المحلولة فى الرياضيات.

نظم الأعداد

كما ذكرت مسبقًا، فإن نظم الأعداد عمومًا هى أهداف أهم كثيرًا من أعـداد معينة. لكل ما نهتم به يمثل وحده فرعًا فى الجبر كبيرًا جدًا لذكره هنا: لنذكر مـن ضمن نظم الأعداد، نظام الأعداد النسبية، الأعداد الحقيقيـة، الأعـداد الـصحيحة، والأعداد المركبة، وأعداد صحيحة تضمين modulo عدد صحيح معطى... إلخ.

إننا هنا نتحدث عن نظم، اذن كل منهم وحيد فى نوعه وذو أهمية أولية فـى الرياضيات. ولكن هناك دورًا أكثر أصالة تلعبه فى الجبر الحديث فئات من الـنظم الجبرية مثل الحلقات، والحقول les corps والزمر... إلخ. تشغل نظريـة الزمـر عمليًا فى كل المجالات الرياضية والفيزيائية، وأيضًا الكيميائية تشغل مكانًا كبيرًا.

الفراغات

كما ذكرنا، فإن المشتغلين بالهندسة، يعدون الفراغات من الأهداف الأوليـة لدراستهم، إن الفراغات الإقليدية ذات الأبعاد الثلاثية والرباعية والخماسية، معروفة للجميع. إن الفراغات ذات الأبعاد الأكثر من الثلاثية تعتبـر معقـدة فـى بعـض الأحيان. ومع ذلك فهى سهلة فى تعريفها. إن نقطة فى الفراغ ثلاثى الأبعاد يمكـن إرجاعها إلى ثلاثة أرقام. إن نقطة فى فراغ ذى سبعة عشر بعدا يمكن إرجاعهـا لسبعة عشر رقمًا. يجب استخدام أعدادا حقيقية لهذا الهدف، بـالمعنى التقنـى، أى كسور عشرية غير محدودة. إن الفراغ الإقليدى ليس سوى مجموعـة نقـط، إنـه

مجموعة من النقط المكونة بشكل معين، فى تعريف الفراغ، مـن المهـم إعطـاء البناء.

إن التحليل الرياضى يستخدم فراغات تشبه إلى حد ما الفراغـات الإقليديـة ولكن لها عددًا لا نهائى من الأبعاد، بعكس ما يحدث فى الفراغ المنتهـى إن ذكـر البعد يكفى وحده لتحديد الفراغ ويوجد تنـوع كبيـر: الأكثـر بـساطة (والأكثـر استخدامًا) من هذه الفراغات هو فراغ هيلبرت، ولكن فراغات باناش، وسـوبولف، هى أنواع أخرى من الفراغات المهمة جدًا فى التحليل.

يدرس المشتغلون بالهندسة كذلك الفراغات التى ليس بها سوى عدد محـدد من النقط. أريد أن أضيف واحدا مميزا بصفة خاصة، إنها فئة M مكونة مـن ٢٤ نقطة نميز فيها بعض الفئات الجزئية المكونة من ثمانى نقط والمسماة بالمستقيمات، حيث خمس نقاط مختلفين ينتمون إلى مستقيم واحد. هذا الفراغ موجـود وأحـادى لأقرب تشاكل. وزمرة التشاكلات الذاتية (أى التبادلات على M المحافظـة علـى نظام المستقيمات) هى زمرة مميزة مسماة "زمره مـاتيو Mathieu" مـن الرتبـة ٢٤٤٨٢٣٠٤٠. استخدمت الخواص التوافقية للفراغ M بشكل أساسـى أثنـاء أول رحلة إلى القمر.

إن فراغات ريمان بالنسبة للفراغات الإقليدية مثل الأسطح المنحنية بالنـسبة للمستوى، مما يعتبر له أهمية خاصة فى الهندسة، وخاصة الهندسة التفاضلية. مـن المشروع إذن أن نراهم كفراغات منحنية.[٤٧] لقد تخيلها ب. ريمـان B.Riemann فى ١٨٥٤. واستخدمها أينشتاين لتأسيس نظرية النسبية بعدها بستين عامًـا. لقـد أدخل ريمان هذه الفراغات فى أبحاثه التأهيلية حيث تحدث عن مـسائل فيزيائيـة وبناءات متناهية فى الصغر للفراغ الفيزيائى وهنـا (فـى ترجمـة ل. لوجـل[٤٨] L.Laugel) يشرح لماذا ادخل هذه الفراغات المنحنية:

---

(٤٧)يمكن قراءة محاضرة رقم ١٧٩ لجامعة كل المعارف التى ألقاها Pierre Bourguignon

(٤٨) Gauthiers Villars : Paris : 1898.

"إن الإجابة على هذه الأسئلة (المتعلقة بطبيعة الفراغ) لا يمكن الحصول عليها إلا بالبدء من مفهوم الظواهر، الذى تحققنا منه حتى هذه النقطة بالتجربة، والذى اتخذه نيوتن كقاعدة، مع إضافة لهذا المفهوم التغيرات المتتابعة، التى تفرضها الحقائق التى لا يمكن لهذه الظواهر أن تفسرها". إن الأبحاث المنطلقة من مفاهيم عامه مثل الدراسة التى نقوم بها (على الفراغات المنحنية)، لا يمكن أن يكون لها فائدة سوى منع هذا العمل (عن شرح الطبيعة) أن يعرقل من قبل وجهات النظر الضيقة، وإن التقدم فى معرفة الاستقلال المتبادل للأشياء لا يجد عقبة فى الأحكام المسبقة التقليدية.

تحليل ونماذج ومحاكاة[٤٩]

بقلم: بيير لوى ليون

Pierre Louis LIONS

ترجمة: مها قابيل

يتعرض هذا البحث لأسئلة مرتبطة بالمحاكاة العددية، وعمل نماذج وأبحاث رياضية مدمجة تتبع من فرع الرياضة المسمى بالتحليل، وهدفنا هو أن نشرح باختصار، وبشكل غير تقنى (أى بقليل جدًا من الشروح الرياضية) ما المحاكاة العددية؟ لماذا هى مهمة أو مفيدة؟ وفى النهاية دور الرياضيات فى الحساب العلمى. بدقة أكثر حتى لو كانت كلمة "محاكاة" (بمعنى حسابات علمية) مرت فى اللغة الدارجة، فنحن نريد:

- أن نشرح بعدة أمثلة الموضوع الممتد منذ عدة عقود والخاص بمحاكاة المعادلات ذات المشتقات الجزئية غير الخطية، أى الحل العددى للنماذج (الفيزيائية، الكيميائية، بيولوجية، والعلوم الهندسية والاقتصاد، والمالية) القائمة على معادلات ذات المشتقات الجزئية.
- نذكِر بتغير النمذجة عبر بعض العناصر التاريخية، الاتجاهات الحديثة المهمة (غير الخطية والتقارب)
- إظهار التفاعلات القوية (فى الاتجاهين) مع الرياضيات، بالأخص مع التحليل الرياضى (تحليل النماذج، والطرائق الرياضية..)

وسنشير كذلك إلى نتائج التفاعلات على تكوين المشتغلين بالرياضيات التطبيقية وكذلك المهندسين.

---

(٤٩) نص المحاضرة رقم ١٧٣ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢١ يونيو ٢٠٠٠.

أمثلة للمشكلات والمحاكاة

ليس ممكنًا فى هذا المقال الصغير ضرب أمثلة عديدة (أو تقديمها بالتفصيل)، وسنعد بالإشارة إلى مثالين (العديد منها سيذكر على التوالى) مأخوذين من تجربتنا الشخصية.

الأول يخص مشكلة محاكاة لوعاء التحليل الكهربائى للألمونيوم، حيث إنها مشكلة صناعية صعبة جدًا من ناحية تعددية وقسوة الظواهر الفيزيائية الداخلة فى اللعبة، والرهان يكون على فهم ما يحدث داخل الوعاء بشكل نستطيع به تحسين أو دراية (وفهم) الأجيال المستقبلية. إن إمكانيات التجريب قليلة جدًا والمحاكاة تبدو الطريق الوحيد لعمل النمذجة أى كتابة المعادلات الرياضية (وشروطها عند النهايات) التى تمثل الظواهر الفيزيائية الرئيسية، هى طبعًا خطوة أولى (حتى لو كان حقيقة، يلزم تأسيس هيرركية حقيقة للنماذج لنأخذ فى اعتبارنا على التوالى وبالتدريج المزيد والمزيد من الظواهر، إذن تسلسل مثل هذا المشروع ليس ببساطة العرض الذى نقدمه).

لقد تكون فريق من ثلاثة مهندسين ومستشار اجتماعى وثلاثة رياضيين تطبيقين (يعاونهم كهروكيميائيين) فى إطار تعاون ضيق على مدى سنوات مع بكينى Pechiney، كَون هذا الفريق نموذجًا (فى حقيقة الأمر نماذج) آخذين فى الاعتبار اثنين من مجالات الفيزياء ترجح معرفة الكهرومغناطيسية وميكانيكا السوائل (إن مثل هذا التقارن ينبع من الهيدروديناميكا المغناطيسية magnetohydrodynamic أو باختصار MHD) بمجرد كتابة المعادلات، يلزم تحليلها رياضيًا وحلها عدديًا.

مثال أخر يخص معالجة الصور والأفلام الرقمية. مثلاً، عند استخراج صور شديدة التشويش من حيث أشكال الأشياء، أو استخراج متتابعة من الصور (الأفلام) المشوشة من الأشياء المتحركة حركة منتظمة.على عكس المثال السابق، فإن النمذجة لا يمكن أن ترتكز على نظريات علمية مستقرة (مثل كهرومغناطيسية

أو ميكانيكيا الموائع) ويجب بناؤها من عدم ex nihilo (أو تقريبًا) مرة أخرى. إن بمجرد وضع المعادلات فالتحليل الرياضى والحل العددى يتبادلان المواقف). فى النهاية فإن ذلك قد تم شرحه بوضوح فى العرض، والحل العددى يسمح بالتجريب، ومن ثم تصحيح النماذج. وبذلك تكون النتائج العملية على الصور والأفلام قد تحسنت كثيرًا خلال العشرين عامًا بمرور متتالى من معادلات خطية إلى (معادلة حرارية = تنقية جاوسية) معادلات غير خطية ضعيفة، ثم فى النهاية إلى معادلة غير خطية قوية جدًا.

المعادلات ذات المشتقات الجزئية EDP أداة أساسية

محاولات تعريف

إن تعريفًا ممكنًا للمعادلات ذات المشتقات الجزئية هو أنها مجموعة من العلاقات (معادلات) بين المشتقات (الجزئية) للدالة. هذه البساطة الظاهرة تخبئ صعوبات كبيرة تصورها بعض النبذات التاريخية المقدرة لإظهار أن مفاهيم المشتقات أو الدوال قد تطورت كثيرًا وتفجرت النقاشات الشهيرة على دلالة هذه المعادلات. بذلك أدخل كل من لايبنتز Leibniz ونيوين Newton مفاهيم غير واضحة تمامًا وصلت بالتدريج فى القرن التاسع عشر إلى مفاهيم دقيقة ومحددة للمشتقات. إذا كان هذا المفهوم قد أصبح المفهوم الرياضى المركزى، فقد حدث تقدم فى القرن العشرين تطلبته الـ EDP المعادلات ذات المشتقات الجزئية (والتى لعب فيها الفيزيائيون مثل ديراك Dirac دورًا مهمًا) عبر أعمال لبزج Lebsegue، وسوبولف sobolev، وليراى Leray، شوارتز Schwartz. هذه الأفكار الطليعية تم ترجمتها بإضعاف كبير للقيود على مفاهيم الدوال وخاصة المشتقات.

من المفيد أيضًا التذكير بالنقاشات المرتبطة بمعادلات الموجات (وأعمال دالمبرت D'Alembert).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \qquad (1)$$

والتى يمكن التعبير عن حلولها فى شكل تطابق لموجتين أى أن

$$u= a(x + t) + b (x + t)$$

السؤال هو (أو كان) معرفة لأى فئة من "الدوال" يكون لـ a , b والمعادلة (١) معنى؟

نوعية السؤال نفسها طرحت عندما اقترح فورييه حل معادلة الحرارة.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial v} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \qquad (2)$$

عن طريق متسلسلات سميت منذ ذلك الوقت متسلسلات فورييهFourrier (وقد ولدت هذه الدراسة قطاعًا جديدًا من التحليل سمى التحليل التوافقى harmonique والذى يمثل سبق فى الطرائق الطيفية فى الحساب العلمى).

لقوانين حفظ الطاقة مثلاً:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u^2) = 0 \qquad (٣)$$

لقد أدخل ريمان Riemann فى القرن التاسع عشر مفهوم الحل غير المتصل (إن عدم الاتصال مرتبط بالظاهرة الفيزيائية لموجات الصدمة) وكيف أن خطأ شهيرًا، تم تصحيحه فيما بعد، هو الذى تسبب فى ميلاد مسألة ريمان، التى هى فى أساس معظم الطرائق الحديثة فى الحساب (نتحدث عن هؤلاء الذين يحلون ريمان) لمثل هذه المعادلات.

فى النهاية سنشير إلى التمييز بين النماذج المكتوبة على شكل معادلات المشتقات الجزئية، وتلك التى تستخدم معادلات تفاضلية عادية والتى تعود إلى التمييز بين المتصل والمنفصل، البناءات المرنة والبناءات الجامدة، أو دوال النقط.

مثال: ميكانيكا الموائع وديناميكا الغازات

يعتبر هذا الموضوع مركزى من وجهة نظر النمذجة وكـذلك التطبيقـات، يبدو لنا من المفيد أن نذكر بعض التواريخ الخاصـة بـالخطوات الرئيـسية فـى النمذجة، (حتى لو كانت هذه القصة بعيدة عن أن تنتهى هذه الأيام بما أنه من المهم اليوم التقدم الدائم فى نمذجة اضطراب turbulence، الموائع المركبة، أو الموائـع الجيوفيزيائية مثلاً). فى عام ١٧٥٥ أدخل إويلر Euler المعادلات التى تحمل اسمه مدفوعًا بالسؤال "العملى" لمفهوم الينابيع la conception de fontaines.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho \mathrm{u}),\ \rho \geq 0$$ الكثافة

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \mathrm{div}\,(\rho \mathrm{u} \otimes \mathrm{u}) + \nabla p = 0\ ,\ \mathrm{u}$$ السرعة p الضغط (4)

هو نظام المعادلات غير الخطية والذى يشير به إويلر إلى صـعوبة تحليـل الحلول (صعوبات بعيدة الحل عن أيامنا هذه) لقد تمكن نـافيرnavier فـى عـام ١٨٢٢ من إدخال حد يعمل على نمذجة التأثيرات اللزجة (أعمـال أنجـزت فـى دراسة لستوك Stokes ١٨٤٥) وأدخل بذلك معادلات نافير – ستوك.

فى عام ١٨٧٢ اقترح بولتزمـان Boltzmann (بعـد أعمـال ماكـسويل Maxwell فى عام ١٨٦٦) نموذجًا للغازات النادرة، وأبدى كيـف (علـى الأقـل شكليًا) يمكن إيجاد معادلات إويلر بدءًا من هذه. لقد درس هلبرت هـذا التقـارب الشكلى فيما بعد.هذه الحلول العددية للنماذج لها تطبيقات وفيرة، ديناميكـا الهـواء (حول الطائرات، والقطارات، والسيارات، والصواريخ وسفن الفضاء فـى الجـو القليل الكثافة). منذ عدة عقود ظهرت للنور تطبيقـات حديثـة: علـم الأرصـاد، والمناخ، سريان الدم، طوفان المكثف، نماذج الانتقال.

معادلات ذات مشتقات جزئية EDP غير خطية

بشكل عام (وبالتالى غير دقيق) تسمح المعادلات ذات المشتقات الجزئية بوصف التغيير لعدد كبير من الجزيئات (فى اتجاه عناصر أولية تستطيع أن تكون جزئيات سائل، أو إلكترونات أو نجوم) فى تفاعل بصيغة السلوك الجماعى (أو المتوسط) من المؤكد أنه هكذا أدخلت هذه النماذج فى الفيزياء أو الميكانيكا، وهو دائمًا الحال بالنسبة للمواضيع الأكثر حداثة مثل معالجة الصور (حيث الجزئيات هى pixels بيكسل والتفاعل يجب أن يحدد تبعًا للأهداف) نماذج النقل (الجزئيات هنا تكون المركبات) أو فى المالية (الجزئيات تكون العوامل التى تتفاعل فى التجارة، هذه العوامل - التجار- يتحدثون عن المنتجات السائلة على الرغم من عدم وجود أية علاقة مع نماذج ميكانيكا السوائل)

إن غير الخطية كلية الحضور فى النماذج (نادرة هى المواقف التى يكون فيها جمع الأسباب يستلزم جمع النتائج)، إن لها فى المقابل مصادر متنوعة: مبادئ أساسية أو غير متغيرة (ميكانيكا الموائع، معالجة الصورة)، قوانين جوهرية مكونة (ميكانيكا الموائع، معالجة الصور، والمالية مثلاً) نتائج المتوسطات (كيمياء الكم، معادلة بولتزمان مثلاً).

إن مفهوم المقياس échelle هو مفهوم مركزى، فالنماذج غير متاحة سوى عند مقياس معين، إن رهانًا علميًا (قابل للتطبيق) رئيسيًا هو فهم العلاقات بين المقاييس والنماذج المرتبطة بها، مما يقودنا إلى نمذجة اقتران المقاييس، الذى يعتبر من وجهة نظر رياضية، التحليل لمشكلات خط التقارب مثل الذى درسها هلبرت والتى تخص الارتباط بين ميكانيكا السوائل (معادلات إويلر، ونافير ستوك) ومعادلات بولتزمان. إنها مشكلة مهمة فى موضع أخر للتطبيقات مثل: محاكاة الصواريخ وسفن الفضاء التى تعمل على ارتفاعات انتقالية إلى الجو ذى الكثافة القليلة.

فى النهاية فإننا نشهد ارتفاع قدرة نمذجة الظواهر المزدوجة سواء من وجهة نظر اقتران المقاييس (المكثفات، الاضطراب مثلاً) أو من وجهة نظر اقتران

النماذج الفيزيائية (مثل MHD علم الصوت فى الجو، علم المرونة فى الجو التفاعل بين السوائل والبناءات - سريان الدم، الأعضاء، صمامات صناعية، الاقتران بين المحيط والمناخ...) هذه النماذج المقترنة تمثل قطعًا هيئات قوية متعددة المذاهب والتى تلعب فيها الرياضيات دورًا مهمًا فى التطبيقات.

تحليل وتطبيقات

عندما نضع نماذج، أى معادلات ذات مشتقات جزئية فيما يخصنا، يكون الهدف هو حلها عدديًا، أى كتابة الكود (برامج الكمبيوتر) يتم فيها فصل هذه المعادلات التى يمكن حلها عن طريق الجوريثمات، هاتان الخطوتان تتبعان من الرياضيات، ولكن من الملائم أن نؤكد على شكل أخر لدور الرياضيات ذات الطبيعة الأكثر نظرية. إنه فى الحقيقة أكثر فائدة وفى بعض الأحيان (أو دومًا) من المهم تحليل المعادلات التى يلزم حلها "لفهمها"، تصحيح المحاكاة (هل النتائج التى يجريها الحاسوب موثوق بها؟) إن التحقق من بعض خواص النماذج المنتظرة (أم لا) تبعًا للحقيقة التى نلاحظها وتحلل الاقتران والشروط الحدية..

فى هذا الموضوع الأخير يمكن أن نذكر من جهة أخرى إويلر والصعوبات التحليلية التى وضع خطًا تحتها، فيما يخص الموضوع الأول، المثال الآتى بسيط جدًا يبين أن التفكير الرياضى لا غنى عنه. لنأخذ المعادلة (الانتشار جهة اليسار بسرعة ثابتة تساوى ١).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial x} \qquad (5)$$

إذا كنا نعلم قيمة u_0 لـ u عند لحظة البداية (t=0) فإن الحل u يعطى فى كل وقت t ب $u_0(x+t)$ فلنختار $u_0(x)=1$

$u_0(x)=1$ إذا كان $0<x$

$u_0(x)=0$ فيما عدا ذلك

لحل (٥) عدديًا يجب تجزئ الفراغ والزمن، أى استبدال x ب $j\Delta$ حيث $j\in Z$ واستبدال t ب kh حيث $(k\in N)$ حيث Δ و h خطوات pas التجزئ المعطى.

وأخيرًا نستبدل $u(x,t)$ بـ u^k_j تقريبيًا لـ $u(x,t)$ حيث

$$x = j\Delta \quad , \ t = kh \qquad t$$

نستبدل $\frac{\partial u}{\partial t}$ب معدل التغير $(u^{k+1}_j - u^k_j)/h$ ويمكن التقريب تبعًا للأولوية باختيار $\frac{\partial u}{\partial x}$

$$(u^k_{j+1} - u^k_j)/\Delta \ , \ \text{أو} \ (u^k_{j+1} - u^k_{j-1})/2\Delta \ , \ \text{أو} \ (u^k_j - u^k_{j-1})/\Delta$$

إن حسابات بدائية جدًا تبين لنا أن إذا كان $\Delta = h$، فالاختيار الأول فقط يسمح بإيجاد الحل الدقيق (u,x,t) فى حين أن الاثنين الآخرين يبدوان كارثتين وإذا كانت $\Delta < h$ فلا يوجد أى اختيار يسمح بإيجاد الحل الدقيق بإخلاص، ونستطيع أن نفهم إذن أهمية التحكم فى الجوانب الرياضية للأسئلة!

فى الوقت نفسه فإن البناءات غير الخطية تجعل التحليل شديد الصعوبة، فالفهم الرياضى لمعادلات إويلر (غير المضغوطة أو المضغوطة) ثلاثية الأبعاد فى الفراغ تبقى إلى الآن محدودة جدًا. إن واحدة من جوايز كلاى أحصت أسئلة (سبع فى مجموعها) ذات صعوبة خاصة (ومهمة) للرياضيين تتحدث بالتحديد عن تحليل حلول معادلات نافير ستوك (غير المضغوطة فى ٣ أبعاد)، إن التقدم الرياضى بطئ ولكنه ذو دلالة، ضمن هذا التقدم والاتجاهات الحديثة فى هذا المجال نشير إلى:

- مفاهيم الحلول لفئات عامة من المعادلات مثل (نظرية حلول اللزوجة مثلاً، التى تسمح أيضًا بطرح معادلات من نوع الحرارة، وتلك التى تتدخل فى التحكم الأفضل contrôle optimal، أو فى معالجة الصور، أو فى مالية...).

- دراسة فئات الحلول (مقابل حل فردى واحد) تسمح بطرح أسئلة متنوعة، مثل الوجود، والاستقرار، والتقريب العددى أو المشكلات الخاصة بخطوط التقارب asymptotiques.
- إعداد أدوات رياضية حديثة تستخدم مجالات متنوعة جدًا فى الرياضيات.

مستقبلاً

لنشير سريعًا إلى بعض اتجاهات النمذجة التى ستوجه بشكل طبيعى الأعمال الرياضية.

- اقتران النماذج.
- اقتران المقاييس.

-آخذين فى الاعتبار الظواهر غير المعروفة جيدًا أو غير المستقرة المعبر عنها "بألفاظ" إستوكاستيك أو إحصائية.

إن الموضوع المطروح فى هذا العرض له نتائج مهمة فى تكوين صغار الرياضيين التطبيقيين، (والمهندسين)، وهو حقًا تكوين متعدد المذاهب ولا غنى عنه. بالإضافة إلى أن الرياضيين متآلفون مع هيئات النمذجة وهيئات التحليل النظرى والمحاكاة (طرائق، وخوارزميات، ومعلوماتية) هى حقًا مفيدة بالنسبة للتطبيقات.

وفى الختام نشير إلى أن هذا العرض كان يربو إلى تصوير الرياضيات المرتبطة بالحقيقة، والتى تطرح مشكلات رياضية مذهلة (من ضمن الصعوبات التى يواجهها الرياضيون).

ضرورة وشَرَاك التعريفات الرياضية[٥٠]

بقلم: جون-بيير كاهان

Jean-Pierre KAHANE

ترجمة: مها قابيل

هذا المدرج مؤثر بالنسبة لى بحجمه وبكونى لا أعرفكم، ومن المفيد أن أقدم نفسى لكم إنى رياضى متقاعد ومجال التميز لدى هو تحليل فورييه l’analyse de Fourier، الذى يمس التحليل الدالى ونظرية الاحتمالات، وتقريبًا كل فروع الرياضيات. مثل كثير من الرياضيين فإنى مهتم بتاريخ الرياضيات وتدريسها. تحقر هذه الاهتمامات جيدًا فى رؤية الماضى والمستقبل للمجتمعات البشرية، نعم إن الرياضيات تبدو لى ذات دور مهم بدوامها وحركتها فى الوقت نفسه.

كما سبق أن ذكرت تحليل فورييه، وتحليل الدوال، ونظرية الاحتمالات. يرتكز تحليل فورييه على تفكيك الدوال إلى قطع صغيرة تسمى التوافقيات harmonique‍s وإعادة بنائها بدءًا من هذه القطع. أما تحليل الدوال يهتم بمعالجة الدوال كنقاط فى الفراغ نسميها فراغات دالية، وتعالج الاحتمالات ما هو لا يقين للوصول إلى اليقين.

إن التعريفات التى أعطيها ليس لها فائدة سوى إثراء حوارنا وجعله أكثر جاذبية، هى غير محددة ومسالمة، وليست ضرورية سواء فى البحث أو التدريس، وعلى حد علمى لا تحتوى على شَرَاك.

على قدر القليل الذى أعرفه عنكم، أعتقد أنكم أتيتم لتسمعوا حديث عن الضرورة والشراك فى التعريفات الرياضية، وأخمن أن لديكم فضولاً لمعرفة ،

---

(٥٠)نص المحاضرة رقم ١٧٤ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٢ يونيو ٢٠٠٠.

الشراك أكثر من الضرورة وأخمن أيضًا أن لديكم أسئلة شراكية سوف تطرحونها علىَّ الآن، والتى لن أستطيع أن أرد عليها، وهدفى أيضًا هو جذب الاهتمام بالشراك. فأنا أعتزم أن أحدثكم الآن عن التعريفات الرياضية كشراك، وأظهر لكم الفخاخ والتحديات، وأعطيكم أمثلة لتعريفات سيئة وتعريفات خادعة وتعريفات غير ممكنة. طبعًا سنرى ظهور أسئلة لفظية، ومنطقية، ويمكن بهذه المناسبة التفكير فى طبيعة المفاهيم الرياضية.

لكى لنبدأ يجب أن أصمم على ضرورة التعريفات الرياضية، وعلى دورها الجوهرى فى البحث والتدريس، فالقضايا تتشابك فى النظرية الرياضية. القضايا التى ننطلق منها هى التعريفات والمسلمات مختلطان معًا. كذلك تظهر التعريفات فى بداية كل نظرية، وسأعالج من هذا الموضوع بشكل طبيعى التعريفات كبداية ولكنى سأبدأ من الناحية العكسية بالتعريفات كنهاية أو نتيجة لمسيرة طويلة من البحث.

إذن سأحدثكم عن التعريفات كنهاية ثم التعريفات كبداية، ثم التعريفات كشراك.

فكرة أن يكون التعريف نهاية أو نتيجة قد لا تكون مألوفة بالنسبة لكم. ولأوضح ذلك سآخذ مثالاً وهو المفضل عندى ففى مستوى البكالوريوس ندرس نظرية رائعة تقال فى ثلاث كلمات: "L^2 كاملة". وهنا المعنى L^2 هى فراغ الدوال التى مربعاتها قابلة للتكامل بمفهوم ليبزج Lebesgue. ونعرف المسافات والزوايا وهندسة كاملة منقولة من الهندسة العادية للفراغ الإقليدى، والفراغ يكون كاملاً إذا استطعنا أن نتناول فيه متتابعات مثل الفراغ العادى: إذا كانت نقط المتتابعة تتقارب من بعضها عندما تكبر رتبة الحد، فإن المتتابعة تؤول إلى نهاية؛ كون L^2 كاملاً مهمًا فى الرياضة والفيزياء وانتصار تكامل لبزج على التكاملات الأخرى هو بشكل رئيسى هذه النظرية، وعمومًا كون الفراغات L^p مكونة من دوال قيمتها المطلقة مرفوعة لأس p قابلة للتكامل بمفهوم لبزج، بالنسبة ل $p \geq 1$ هى فراغات كاملة. نميز هذه النظرية باسم فريدريك ريتز، والتى يعود تاريخها إلى عام ١٩١٠.

ولكن فريدريك لم يذكرها بهذا الشكل فلم يكن في عصره فراغـــات L^p ولا فراغات كاملة ولكن كان هناك اهتمام كبير بتكامل لبزج وبمتسلسلات فورييه. لقــد واجه المجرى فريدريك ريتز Frédéric Riesz والنمساوى إرنـــست فيـــشر Ernst Fischer في عام ١٩٠٧ هذا الموضوع بكياسة ولكن بحسم في مجلـــة Comptes rendus de l'Academie des sciences وأنشأ كلا الاثنين خاصية مميـــزة جــدًا لمتسلسلات فورييه، إذا علمنا أن قوانين فورييه (من جهة حساب المعاملات بـــدءًا من الدالة ومن جهة أخرى حساب الدالة بدءًا من المعاملات) تعبر بشكل طبيعـــى من الفراغ L^2 إلى الفراغ l^2 المكون من متسلسلات من الأعداد التى مربعاتها تكون متسلسلة قابلة للجمع. بعد ذلك في عام ١٩٤٩ صنف فريدريك ريتز هذه النظريـــة التى نعطيها كلاً من الاسمين لريتز وفيشر، بتذكرة دائمة ذهاب وعودة مـــا بـــين فراغين لهما أبعاد لا نهائية.

إن المسألة التى يعود إليها ريتز فى مذكرته الأخيرة هى توصيف معاملات فورييه للدوال القابلة للتكامل. فنحن لا نستطيع أن نفعـــل ذلـــك ولكـــن نوصـــف معاملات فورييه للدوال التى مربعاتها قابلة للتكامل. إنها "التذكرة ذهـــاب وعـــودة" التى تحدث عنها عام ١٩٤٩ والتى نسميها حسب البلاد ريتز – فيشر أو فيـــشر – ريتز، وطريقة البرهان تقدم لنا الفراغ الذى نسميه L^2 والخاصـــية التـــى نـــسميها كامل. وهذه الطريقة التى نستخدمها الآن كنظرية، ونستخدم المفاهيم التحتيـــة "L^p" و"كامل" كمفاهيم معرفة تعريفًا تامًا، وهكذا نعبر عن النظرية فى ثـــلاث كلمـــات ولكن الكلمتين "L^2 " و"كامل " هى نهاية مسيرة طويلة، وإكـــسير حقيقـــى للفكـــر الرياضى. إن مادة كل من المسألة، والحل، والطريقة قد مرت خلال التعاريف.

لقد أخذت وقتًا فى هذا المثال ولكن يبدو لى أن الظاهرة عامـــة تمامًـــا: إن التعريفات الملائمة فى الرياضيات هـــى نتيجـــة لتـــاريخ طويـــل مـــن الأعمـــال جميلة.الحكاية تعود لجوزيف فورييه وما بعد ذلك. لقد تأثر ريتز وفيـــشر بلبـــزج وهيلبرت وهندستهم للدوال التى انضمت إلى الفراغات المجردة لموريس فريـــشيه

Maurice Frichet،التى يعود تاريخها إلى عام ١٩٠٦، ولكن ليس إلا فـــى عـــام ١٩٣٢ مع ستيفان باناش Stefan Banach ونظريته للعمليات الخطيـــة أن تبـــوأت الفراغات الكاملة مكانتها واسمها فى التحليل، وقد أشار باناش من ضـــمن الأمثلـــة الأولى للفراغات L^p، وسميت كذلك ولاء للبزج.

إن تعريف الفراغات L^p والفراغات القياسية الكاملة هى بلا شك النقلة الأكبر ما بين تحليل فورييه والتحليل الدالى، ولكن التفاعل ما بين المجالين اســـتمر علـــى مر القرن وتم تحديده بسلسلة من التعريفات: بالإضـــافة إلـــى فراغـــات هيلبـــرت وفراغات باناش، هناك سلسلة كاملة من الفراغـــات الداليـــة – فـــراغ ســـوبوليف Sobolev، فـــراغ بيـــزوف Besov، وفـــراغ شـــوارتز Schwartz، وجبـــر وينر Wiener، وجبر بويرلنج Beurling، ومفاهيم عامـــة جـــدًا مثـــل الالتفـــاف convolution، وأدوات مثل تفكيك ليتلوود – بالى Littlewood-Paley، والذرات والجزيئات التى شغلت الاهتمام فى سنوات السبعينيات وفـــى النهايـــة المويجـــات. سأعود للالتفاف والمويجات. فى كل الحالات التى ذكرتها تكون التعريفـــات هـــى نتيجة إجراء طويل، إنها تعنى أن المفاهيم مهمة وبسيطة وقوية، تم استخراجها من حمم المعرفة التى قدمتَها بلا انقطاع حركة الرياضيات. طالما استخرجت ســـتكون الحمم فنستطيع أن ننسى أنهم نتيجة ونأخذهم كنقطة انطلاق، ولكن جمالهم وقدرتهم تأتى من كونهم إكسير الفكر.

هكذا، أعتقد أن الأشياء الأكثر تقليدية فى الهندسة، مثل الـــدوائر والكـــرات ومثل أشياء أكثر عمومية انطلقت خلال القرن مثل: الزمـــر والفراغـــات المتريـــة والاحتمالات. فغالبًا ما تبلور الكلمة مفهوم. وهكذا أصبحت الحركـــة البراونيـــة Brownien motion التى لاحظها عالم النباتات فى ١٨٣٠، ودرسها الفيزيـــائيون، وأعدها أينشتاين ووينر، أصبحت ذات كيان رياضى جيد التعريف ؛ عندما يتحدث اليوم الفيزيائيون عن الحركة البراونية يرجعون إلى الحركة البراونية التى عرفتها الرياضيات وليس عمومًا للحركة التى نلاحظها للجزيئات المعلقة فى سائل. كـــذلك

فى مجال آخر كالمنطق ونظرية الأعـداد. إن تعريـف مجموعـات ديـوفنطس diophantiens الذى هو بسيط وكان يمكن أن يعطى منذ قرون لم يظهر سوى عام ١٩٥٠ ليسمح بترجمة عدد كبير من المسائل الخاصة على شكل فرضـية عامـة جدًا، وقد حل الفرضية الروسى ماتياسيفتش Matiassivetch عام ١٩٧٠، وحل فى الوقت نفسه المسألة العاشرة لهيلبرت واستحق عنها وسام فيلدز Fields. والآن هذه المسائل ليس لها سوى أهميـة تاريخيـة ولكـن تبقـى مجموعـات ديـوفنطس diophantiens كهدف مهم للدراسة؛ وواحدة من جواهر النظرية هى أن مجموعة الأعداد الأولية تعتبر ديوفنطية diophantiens وبدقة أكثر إنها تنطبق مع مجموعة القيم المأخوذة لكثيرة حدود معينة عديدة المتغيرات عنـدما نعطيهـا قـيم أعـداد صحيحة.

فى كل الدراسات الرياضية منذ إقليدس Euclide وبورباكى Bourbaki وما بعد ننطلق من تعريفات، إننا نعيد كتابة التاريخ بالمقلوب. ولا يحـدث ذلـك فـى الرياضيات فقط، ولكن سواء بالنسبة للفلك أو الأحياء، يأخذ البحث فى موضوع ما كنقطة انطلاق، ما هو يعتبر تاريخيا نتيجة أو نهاية ونسمى ذلك نقلة تعليمية.

إن بحث باناش عن العمليات الخطية التى تحدثت عنها منذ قليل يعتبر مثالاً رائعًا أنه يعرف بالدور الفراغات المترية و(التى يسميها "فراغات D "D للمـسافة أنها الفراغات التى تعرف مسافات بين نقط) ومتتابعات كوشـى Cauchy (التـى حسب فيشر نسميها "متسلسلات تقاربية") والفراغات المترية الكاملة وخاصية بيـر Baire (كل تقاطع غير قابل للعد لمجموعة كثيفة مفتوحة يعتبر كثيـف – والـذى يساعد الآن على تعريف فراغات بير)، فراغات باناش التى نسميها "فراغات مـن نوع B" مثلاً فراغات L^p. كما نرى فإن الاصطلاح تغير قليلاً منذ ذلـك الوقـت ولكننا ليس لدينا أى مشكلة فى التعرف على فراغاتنا المترية، ومتسلسلات كوشـى وفراغات باناش؛ لأن التعريفات مكونة بشكل رائع. إن حقيقة أن الفراغات L^p هى فراغات باناش هذه الحقيقة هى نظرية ريتز التى حدثتكم عنها. إن التعريفات تأخذ مكانها بشكل سريع جدًا، ويستطيع المعاصرون أن يتعرفوا فى هذه التعريفات على

معارف متناثرة مرتبة ترتيبًا رائعًا قام بإعدادها المحللون والعاملون بالتوبولوجيا في المجال الكبير الذى اصطلح البولونيون فى فترة ما بين الحربين على تسميته نظرية المجموعات. بالنسبة لنا اليوم تعتبر هذه المفاهيم تقليدية وحديثة جدًا فى الوقت نفسه. إن خاصية بير لم تتوقف عن أن تفرز روائع فى التحليل؛ حيث إنها إحدى أدواتنا الفكرية الأكثر قوة لإنتاج وتطويع الوحوش. إن هندسة فراغات باناش موضوع كبير للدراسة حيث المشاركات الفرنسية تعتبر مميزة، وتُعد التعريفات التى أعطاها باناش هى نقطة انطلاق ليس فقط للعمل الكبير الذى يمثل كتابه ولكن لجزء كبير من تحليل الدوال المعاصر.

لقد تذكرت إقليدس وكنت أود أن أحدثكم عن أشياء رياضية مألوفة وهى الدائرة والكرة، أتعلمون تعريف الدائرة حسب مفهوم إقليدس، بدءًا من مركز الدائرة؟ إنها مرتبطة بتجربة مألوفة أن نرسم دائرة من خلال فرجار، أو وتد، أو حبل، وهى ممتازة كنقطة بداية لهندسة الدائرة كما شرح إقليدس. بالفعل إن هندسة المستوى لإقليدس هى زواج لهندسة المثلث وهندسة الدائرة ومن خلالها يأخذ تعريف الدائرة قيمته. كان يمكن أن نُعرف الدائرة بطريقة أخرى مثلاً هى الدائرة التى قطرها AB والتى هى المحل الهندسى لنقط تكون مع القطعة المستقيمة AB زاوية قائمة، أو أيضًا الدائرة هى منحنى مغلق ذو انحناء ثابت وهو ما يسمح لرجل كفيف أن يعرف أن الصحن دائرى وذلك بتمرير إصبعه على طرفه، أو أيضًا الدائرة تحتجز مساحة قصوى لمحيط معين معطى وهو ما يشرح الكثير من الأشكال الدائرية مثل الدائرة التى يصنعها الأطفال عندما يمسكون أيديهم فى أيدى بعض. فى كل هذه التعريفات ليست مسألة مركز ونصف قطر فبالفعل فى حياتنا المعاصرة لا نحتاج لمركز كى نتعرف على الدائرة. إن قوة تعريف إقليدس هى أولاً أن كل الناس تستطيع أن تفهم ثم تسمح بعد ذلك بإيجاد عن طريق تسلسل شبه ممهد أن هذه التعريفات ممكنة وأخرى كخواص مميزة للدائرة. إن الخواص الزاوية موجودة لدى إقليدس ولكن كان لابد أن ننتظر نيوتن Newton من أجل الانحناء ونهاية القرن التاسع عشر من أجل خاصية تساوى المحيط isopérimétrique.

إن الدائرة مادة لا تنضب وأخذت أشكالاً جديدة فى القرن العشرين، فى البداية هى مادة الهندسة الإقليدية التى تعتبر أن اللامتغيرات هى المسافات والزوايا. ولكن الرياضيات تقدمت مثل الكائنات الحية بفقد البنية، بفقد كلا من متغيرات المسافات والزوايا مع الاحتفاظ بالنسب بين المسافات والنقط التى على استقامة واحدة نستطيع أن نحصل على هندسة تآلفية وتكون الدائرة نموذج للقطع الناقص. إذا احتفظنا بنسب النسب، والتناسب ثنائى التوافق bi-rapport نستطيع أن نحصل على الهندسة الإسقاطية geometrie projective، والدائرة هى نموذج للمخروط. إذا احتفظنا فقط بالبناء الطوبولوجى للمستوى ستبدو الدائرة نموذج مثالى للمنحنى المغلق الأكثر عمومية وهو منحنى جوردان Jordan. نستطيع أن ننسى الدائرة كشكل مستوى ونعتبرها مادة طوبولوجية نقيم عليها عمليات دورانات. فى الأدب المعاصر عندما نتحدث عن الدائرة تكون هذه المادة الطوبولوجية موضع السؤال. إن دراسة الأنظمة الديناميكية التى تميز بها الفرنسيون منذ هنرى بوانكاريه إلى جون - كريستوف يوكوز Jean – Christophe Yoccoz تبدأ باعتبار تحويلات الدائرة على نفسها إننا نكرر أن سرعة مسارات نقطة هى الصور المتتالية لهذه النقطة عبر تحويلات متكررة، وكل الظواهر الدورية يمكن أن تتمثل فى الدائرة، ويمكن اعتبار متسلسلات فورييه دراسة متعمقة للدائرة كزمرة طوبولوجية. عندما يكون هناك عدة دورات يحل الطوق محل الدائرة، بحيث إن للغرابة، تبدو الدائرة كطوق فى تحليل فورييه ذى بُعد واحد ولا نشير لها بالحرف C المخصص لحقل الأعداد المركبة، ولكن بالحرف T يمكن أن نمضى حياتنا - وهذه هى حالتى - فى مشاهدة ما يحدث داخل الدائرة T.

الشيء نفسه تقريبًا بالنسبة للكرة من المشروع تعريفها عن طريق المركز ونصف القطر كما فعل إقليدس، إنها نقطة جيدة للانطلاق لكن ذلك لا يتعلق بتجربة مألوفة، بالنسبة لليونانيين فى وقت أفلاطون التجربة المألوفة هى الخاصة بالاثنتى عشرة كرة ذات القطع الملونة التى ذكرها سقراط Socrate فى كتابه "فيدون"

Phedon والتى تمثل بالنسبة له الأرض مرئية من السماء. وشرح أفلاطون Platon من جهة أخرى فى محاورات "تيميه" Timé أنه الشكل ذو الاثنى عشر وجهًا الذى لا يريده أحدا ضمن مجموعة الأشكال عديدة الأوجه التى تمثل العناصر الأربعة التى ساعدت الله فى تشكيل الكون. الكرة بالنسبة لأفلاطون هى الشكل الأكثر كمالاً والأشبه بنفسها. "إن الشكل الذى يشبه نفسه الأكثر" هذا التعريف ليس تعريفًا رياضيًا جيدًا ولكنها رؤية غنية للكرة، ويجب أن تتجه النظرية إلى إيجادها بدءًا من التعريف؛ أولاً من ضمن الأشكال المحددة (التى لها حدود) فى الفراغ، زمرتها التشاكلية، أو أيضًا زمرة التحركات التى تتركها لا متغيرة وهو الأكثر إمكانًا، ثم كل جزء صغير يسمح بإيجاد الكل. كذلك لنقدر تعريف الكرة بدءًا من المركز ونصف القطر، يجب أن نذهب إلى قانون جيرار Girard الذى يربط المساحة بالزوايا ومنحنى المثلث الكروى. إن قانون جيرار الذى فسر تفسيرًا ملائمًا يصلح لأى سطح منحنى ويمكن أن يخدم فى تعريف الانحناء الداخلى، والكرة هى أيضًا مادة لا تنضب.

فى الدرس الأول له فى الـ Ecole Normale لسنة ثالثة، الذى كان لامعًا ومؤقتًا، بدأ جاسبار مونج Gaspard Monge بتعريف المواد المستخدمة فى الهندسة وخاصة الدوائر والكرات وفى نهاية المحاضرة تمكن الطلبة من استجواب الأستاذ، وكان هناك مختزلون يدونون المناقشة، مما يسمح لنا بالاستفادة من الموقف. وجه الطالب جوزيف فورييه Joseph Fourier الكلمة لمونج وكان راضٍ عن تعريف الكرة وليس عن تعريف الدائرة التى كانت تحتاج من وجهة نظره تعريف المستوى، واقترح تعريفه للمستوى كفئة من النقط المتساوية فى البعد عن نقطتين معطيين، ثم تعريفه للخط المستقيم كفئة من النقاط المتساوية فى البعد عن ثلاث نقاط معطاة، ثم تعريفه للدائرة كفئة من النقاط التى تبعد مسافة معطاة عن نقطتين معطتين. ورد عليه الأستاذ مونج: "يا مواطن إن الوضوح الذى تعرض به أفكارك لهو دليل على حكمة فكرك، إن التعريف الذى تعطيه للخط المستقيم هو تعريف قاسٍ، اسمح لى بهذه المناسبة أن أطلعك على بعض الملاحظات" وقال له

مونج إنه يجب أن يعتاد المرء على الهندسة، والخط المستقيم ليفهم التعريف وهذا لا يحدث في بداية المحاضرات. وبعد ذلك بمائة عام عمل هنرى بوانكاريه صدى لمونج عندما كتب فى مجلة l'enseignement mathématique فى ١٩٠٤ "إن تعريفا جيدًا هو ما يفهمه الطلبة"

قد يكون من الأهمية بمكان، علاوة على ذلك، أن نعيد التعريفات التى اقترحها فورييه فى زمانها. وكان بونابارت Bonaparte سيذهب إلى إيطاليا ليحضر نظرية الإنشاءات التى وضعت دون مسطرة إنما بالفرجار فقط، لهذا السبب كان سيذهب ليلتحق بالدرس الأول في معهد العلوم. إن تأسيس الهندسة على مفهوم المسافة والمسافة فقط فى هذا الزمن هو اتجاه ليس له مستقبل. أعاد تناوله موريس فريشيه في ١٩٠٦ فى إطار "الفراغات المجردة"، إنه تأسيس للفراغات المترية والذى نسميه اليوم الكور les boules فى الفراغات المترية كان يسمى فيما مضى الكرات les sphères: إنها فئات من النقط التى تبعد عن نقطة (المركز) مسافة اقل من رقم معطى (نصف القطر). لم يشك فورييه فى الدور الذى سوف تلعبه الكرات les boules فى الفراغات المترية فى تحليل فورييه.

من المناسب أيضًا التفكير فى قانون بوانكاريه Poincaré "إن تعريفًا جيدًا هو الذى يفهمه الطلبة". فهو هدف أكثر منه حقيقة فكلما كان التعريف عامًا وقويًا، كلما كان تمثله أقل. إن الزمر، والفراغات المترية، الانضغاط، والكمال، والفراغات الفيكتورية espaces Vectorielles تعرف فى سطور وفى بعض الأحيان فى كلمات ولكن هذه التعريفات لا تأخذ معنى إلا عندما نتقدم قليلاً فى النظرية لنرى على الأقل جزءًا من النتائج التى تاريخيا وصلتنا لتكوين هذه المفاهيم كذلك التعريفات يجب أن تكون مقبولة، ومعلومة قبل أن نستطيع أن نفهمها فعلاً. كى تكون مقبولة ومعلومة نستطيع أن نعلق عليها ونؤيدها بالأمثلة والأمثلة المضادة. لكى تفهم أفضل، يجب تطوير النظريات التى ليست سوى البداية.

يتمثل الفخ الأول فى التعريفات فى تلك التى تكون أكثر قصرًا وأكثر كمالاً. أن نعتقد أن ما هو سهل فى الاستيعاب هو البسيط فى القول. ويبدو لى أنه مرتبط برؤية معينة للرياضيات، تكون من خلالها الأهداف الرياضية وتعريفاتها موجودة قبل الإنسان فى عالم مثالى مثل التفاح الذى نجنيه من شجرة المعرفة. فور ما نكتشف التفاحة ونجمعها لماذا لا نستهلكها مباشرة؟ كذلك بناء الزمرة بسيط وجميل وقوى حتى أننا لنندهش من أنه اكتشف متأخرًا، وإنه كان لابد من الاستعجال فى إدخاله فى قاعدة التدريس الرياضى. لقد كانت مرحلة المصلحين فى الستينيات، وأدت إلى فشل. إذا اعتبرنا على العكس التعريفات الأكثر بساطة كنتيجة لإجراء طويل من التقطير المتتالى، كإكسير للفكر، يجب أن نعالج كل واحدة كماء حياة قوى، أن نشم ونتذوق ونستهلك ببطء، مع بعض الغذاء الناشف إذا كان ممكنًا، ونهضم ونتمثل آخذين وقتنا.

الفخ الثانى هو أن نثق كثيرًا فى التعريفات فهناك تعريفات سيئة، أو غير مفيدة، أو مزعجة. وسأعتمد هنا على مثال فى تعريف المتسلسلات فمنذ نصف قرن بعد بورباكى، تعطى أعمال التدريس والقواميس المتسلسلات التعريف الآتى: إن المتسلسلة هى زوج من المتتابعات $(u_n), (s_n)$ مرتبطة بالعلاقة

$$s_n = u_1 + u_2 + u_3 + \ldots + u_n$$

فتكون المتتابعة u_n المكونة من الحدود، والمتتابعة s_n المكونة من المجاميع الجزئية؛ ونقول إن المتسلسلة تتقارب إذا كان لها مجموع s عندما تكون s_n تقاربية ولها نهاية s. هذا التعريف وقعه جيد ولكنه سيئ ففى زوج المتتابعات لا تأتى المتتابعة الثانية بجديد، فهى محددة تحديد تام بالأولى. إن التعريف لا يؤيد إلا بلعبة كلمات: فإن المتسلسلة تقاربية إذا كانت المتتابعة الثانية تقاربية. وتحت هذه العلاقة الوحيدة تكون غير مطابقة. ولكن هناك ما هو أسوأ: فإنها تتعلق بفكرة أن الشىء الوحيد المهم بالنسبة لمتسلسلة أن تكون تقاربية أو تباعدية. فى حين أن ما هو حيوى فى المتسلسلات هو شىء آخر مثلاً المتسلسلات الكثيرة الأجزاء لم يوجد بالنسبة لها أى مفهوم واضح للمجاميع الجزئية، أو إجراءات الجمع التى تسمح بإعطاء مجموع

للمتسلسلات التباعديـــة، أو المتسلـــسلات التـــى تتقـــارب بـــبطء أو بـــسرعة، أو المتسلسلات التى نرتبها حسب حجم حدودها،المتسلسلات التقاربية التى تتباعد دائمًا وتسمح مع ذلك بحسابات رقمية ذات دقة عالية. عندما حدد فورييه ثم كوشى مـــا يجب فهمه من المتسلسلات التقاربية كان يعتبر تقدم فكرى كبير. ولكن إذا فكرنـــا أن ذلك يعنى روح مفهوم المتسلسلات فإننا بذلك نتجاهل غناها. لقد استطاع إويلـــر Euler وبرنولى Bernoulli فى القرن الثامن عشر أن يديروا بمهارة المتسلـــسلات التباعدية. ثم أتى فورييه بعد ذلك ليستخدم متسلسلات حـــساب مثلثـــات لحـــساب درجات الحرارة فى المتوسط، كما قال إنها "متسلسلات شديدة التقارب". وتفـــرض متسلسلات الدوال وخاصة متسلسلات حساب المثلثات إدخال إجراءات عديدة مـــن الجمع. إذا حددنا نفسنا فى التقارب والتباعد، نكون قد حذفنا جزءًا من المفهوم.

إذن ما هى المتسلسلة ؟بالنسبة لى هى مجموع لا نهائى نحاول أن نعطى له معنى قد يكون شكلى تمامًا: بالنسبة لكتابة المجموع اللانهائى نـــستطيع أن نجـــرى عليها عمليات جمع، وضرب وعمليات أخرى. هناك جبـــر كامـــل للمتسلـــسلات الشكلية الذى لا يحتاج مطلقًا إعطاء قيمة لمجمـــوع المتسلـــسلة. ولكـــن عمومًـــا، فالمتسلسلة هى مجموع لا نهائى نحاول أن نعطيه قيمة، قـــد تكـــون محـــددة بـــلا غموض إذا كانت الحدود موجبة أو إذا كانت تكوِن عائلة قابلة للجمع أما غير ذلك فيتوقف على إجراء الجمع. فى كل الأحوال إن عالم الحساب يستحق للانتباه. ففـــى كل ما ذكرته، هناك مادة للعديد من التعريفات الرياضية (متسلسلات شكلية séries formelles، إجـــراءات جمـــع procédés de sommation، عـــائلات قابلـــة للجمع familles sommables)

و لكنى لن أعطى تعريفًا رياضيًا للمتسلسلة.

أضيف كلمة بالنسبة لمتسلسلات فورييه لقد كانت المتسلسلات كما ذكـــرت بالنسبة لفورييه أداة لنظريته فى التحليل الحرارى. ولكنه كان يريـــد أن يعممهـــا، وجعل منها مادة دراسية أعطت الفرصة منذ قرنين لأعمـــال صـــعبة ومهمـــة. إن

المجاميع الجزئية لمتسلسلات فورييه ليست مادة سهلة التناول مـــن وجهـــة نظـــر عامة. نعلم انه منذ أكثر من قرن منذ بـــوا ريمـــون (Bois Reymond 1837) إن متسلسلات فورييه لدالة مـــستمرة يمكـــن أن تتباعـــد فـــى نقطـــة، ومنـــذ ١٩٢٦ كولموجوروف (Kolmogorov) ومتسلسة فورييه لدالة قابلة للتكامل بمفهوم ليزج (أى دالة من الفئة L^1) تتباعد فى كل مكان وليس سوى فى عـــام ١٩٦٨ بفـــضل (كرلسون Carleson ثم هانت Hunt) ما عرفنا ان متسلسلات فورييه تعتبـــر دوال من فئات L^p حيث $P>1$ تتقارب تقريبًا فى كل مكان. بالنسبة للدوال من فئة L^1 فإن سرعة التباعد هى أيضًا لغز، ولكن حدث تقدم فـــى ١٩٩٩ علـــى يـــد الروســـى كورياجين Koryagin. لقد كان بمثابة عمل مميز من الصياغة.

ولكن هناك سؤال الطبيعى أكثر من تقارب المجاميع الجزئية عند نقطة مـــن وجهة نظر الحساب العددى: هو تقارب المجاميع التى نحصل عليها بإهمال الحدود الصغيرة جدًا، ولنقل، الحدود التى قيمها المطلقة أصغر مـــن ε معطـــاة، عنـــدما ε تؤول إلى الصفر. لقد وضع السؤال فى إطار الفراغات الدالية مثل L^1 أو L^p، فى أوائل سنة ١٩٦٠، وقد كانت أول مشاركات لى. إن هذا الـــسؤال يطـــرح اليـــوم وأعطى مكانًا لأعمال جميلة فيما يتعلق بالسلوك "فى كل مكـــان". ســـأحدد نفـــسى بالإشارة إلى النتائج بشكل غير دقيق: إنها سالبة، بمعنى أنها تباعديـــة فـــى حالـــة متسلسلات حساب المثلثات، أى أنها متسلسلات فورييه بمعنى الكلمـــة، وموجبـــة، بمعنى متسلسلات تقاربية، فى الفراغات الدالية العادية وفى كل مكان، فـــى حالـــة متسلسلات المويجات.

وهكذا فإن متسلسلات فورييه هى المسؤولة تاريخيًا عن الأحسن والأســـوأ. الأحسن هو الإعداد لمفهوم التقارب والأعمال الجميلـــة علـــى التقـــارب والتباعـــد وإجراءات الجمع، وإدخال الفراغات الدالية التى تحدثت عنهـــا بمناســـبة نظريـــة ريتز- فيشر، ونظرية المتسلسلات المتعامدة التى تعتبر نظرية المويجات النـــسخة المعاصرة الأكثر أهمية منها. الأسوأ هو تثبيت التقارب، بتحجير إسهامات فورييـــه

وكوشى. وهذا التثبيت ينتهى بالتعريف غير الملائم، الذى أعطيته الآن عن المتسلسلات.

بالفعل إن مفهوم المتسلسلات غنى جدًا أغنى من أن يقدم نفسه فى تعريف رياضى. إنه نوع من المجال الرياضى بداخله جزيئات قد تكون محدودة بوضوح عن طريق تعريفات رياضية دقيقة وملائمة، ولكنه من غير المناسب أن يحدد نفسه بهذا الشكل. طبيعى أن التعريف السيئ لا يمنع الرياضيين من العمل على المتسلسلات كما يجب، والشرك هنا يتمثل فى الذين يدرسون ويتعلمون الرياضيات.

إن الوضع قريب من التكامل. فى برامج المدرسة الثانوية فى العام الماضى كان يتم تعريف تكامل دالة على فترة على أنه الفرق بين قيم أولية على أطراف هذه الفترة. كان القانون يتخذ كتعريف

$$\int_a^b f(x)\,dx = F(b) - F(a)$$

الذى نسميه فى تقديمات أخرى؛ النظرية الأساسية لحساب التكامل. كنا ننطلق اذن من التكامل كعملية معاكسة للتفاضل، وبدأنا بالمعادلة التفاضلية $y' = f(x)$، التى تكاملها فى مفهوم المعادلات التفاضلية يسمى المعادلة الأولية ل f، هذا التعريف ليس عبثيًا: إنه يسجل تكامل فى إطار نظرية المعادلات التفاضلية، فهو ينسب دفعة واحدة للحساب الشكلى، نتاج لابلاس Laplace وليونفيل Lionville، اللذين أعطتهم الحاسبات شبابًا جديدًا، وتناظر تجربة معاصرة، تلك الخاصة بعدادات الكيلومترات للسيارات التى تقيس المسافة بتكامل السرعة. إذا انطلقنا من المعادلات التفاضلية وأدخلنا بشكل ما الدوال العادية اللوغاريتم والدالة الأسية، دوال حساب المثلثات، وعالجنا التكامل كناحية من الحساب الشكلى فهو إذن خيار ممكن.

الشرك هنا هو أن التعريف يجذب إلى النواحى الأكثر شكلية من حساب التكامل، إلى تمارين للحساب، والى الضرر من فهم ما هو التكامل،. إذن ما

التكامل؟ إنه سؤال قد شغل الرياضيين فى القرن التاسع عشر، المرتبطين مرة أخرى بتحليل فورييه، لإعطاء معنى للتكامل الماثل فى القوانين التى تعطى معاملات فورييه. لقد تصدى لها كوشى ثم ريمان Riemann وقد ظهر تكامل ريمان خلال عدة عقود كجوهر للمفهوم. ثم اقترح لبزج تعريفه الذى رأيناه، ورأينا مميزاته فى شكل نظرية ريتز- فيشر. لقد عرف القرن العشرين انفجار لنظريات التكامل، مع دنجوى Denjoy وحساب الأوليات، ودانيال والتكاملات الدالية و وينر ونظرية الحركة البراونية، وكولموجروف وفراغات الاحتمالات، شوارتز والتوزيعات، إيتو Ito وتكاملات الستوكاستيك، فينمان Feynman وتكاملات الطرائق، والتى أعطاها بيير كارتييه Pierre Cartier وسيسيل دى ويت Cecile de Witt تعريفًا رياضيًا حقيقيًا. ما المشترك فى كل هذه التكاملات والذى يسميه يورى منين Youri Menin وجهة النظر الفيزيائية: التكامل هو كمية من شيء ما فى مجال. إنه ليس تعريفًا رياضيًا ولكنه رؤية تسمح بفهم اتجاه هذا المفهوم؛ مثلاً التكامل يمكن تمثيله بمساحة، أو حجم، أو فيض، طاقة،... إلخ. وذلك له نتيجة تربوية فى برامج المدارس الثانوية عندما نبلغ التكامل، يجب الانطلاق من حساب المساحات وحساب الأوليات. إنه المدخل الطبيعى لطرائق التكامل التقريبية، والى الجانب العددى من التكامل.

إن الشِرك هو فى الاعتقاد بوجود تعريف واحد فقط صحيح للتكامل. يجب أن نذهب أبعد من ذلك فى التحليل فى الهندسة فى الاحتمالات، كى تجتمع الجوانب المختلفة بعضها ببعض.

إن ما قلته لتوى عن المتسلسلات والتكاملات صحيح بالنسبة لمواضيع أخرى. وسأحدد نفسى فى الالتفاف convolutions ، والمويجات ondelettes والكسوريات fractales.

ظهر مصطلح الالتفاف فى منتصف هذا القرن (القرن العشرين)، ولكن المفهوم كان معروفا لدى الفيزيائيين: إن تأثير جهاز ما على إشارة هى الالتفاف،

والبحث عن الإشارة بدءًا من الملاحظة هـــى فــصل الالتفـــاف deconvolution.
ويكتب ذلك A*X = B:A هى دالة الجهاز، X هى الإشـــارة المجهولـــة، * هـــى
علامة الالتفاف.، B هو ما نلاحظه. إن نظرية الالتفاف عديدة الأشـــكال: فـــنحن
نجدها فى تحليل فورييه مع نـــوربرت وينـــر Norbert Wiener، فـــى نظريـــة
التوزيعات مع لورنت شوارتز، وفى كل خطوة من التحليل العددى والاحتمـــالات.
ولكنى لا أعرف أى نظرية تغطى كل الحالات.

لقد تحدث إيف ماير(٥١) Yves Meyer هنا أيضًا عن المويجات، ولم يعطها
تعريف،خفية إلا كإجابة على سؤال. لان المجال الذى تشغله اليوم المويجات يفـــوق
بكثير كل التعريفات الممكنة. لقد تغير الوضع تمامًـــا منـــذ ســـبتمبر ١٩٨٥ وأول
مؤتمر يتعاطى مع هذا الموضوع، في مدرسة فرنـــسا College de France. لقـــد
وجد إيف ماير دالة غريبة، تتقاسم كثير من الخواص مع الدالة السلمية لهار Haar
والتى تأخذ القيمة ١ فيما بين صفر و½ والقيمة -١ فيما بين ½ و ١ وصفر عنـــد
أى قيمة أخرى. ولكنها منظمة جدًا: لقد عرّفها،وتم جدولتها tabuler واســـتخدامها،
لقد كانت مويجات ماير، تبدو مشروعة ومستقرة مثلها مثل الجا والجتا cos , sin.
نمت المويجات فى السنوات التى تلت ذلك مثل عيش الغراب، مع مويجات متنوعة
الانتظام ومتنوعة الأشكال يتم تكييفها لمختلف الاستخدامات. الجوهرى هو وجـــود
نظم مويجات متعامدة مناظرة لنظم Haar ومتسلسلات لمويجات مناظرة لمتسلـــسلة
Haar. ولكن حتى ذلك يعتبر تحديدًا ضيقًا جدًا. لقد تجنب إيف ماير الفخ بإعطـــاء
رؤية للمجال الرياضى للمويجات من الخارج، عن طريق الحكاية والتطبيقات.

إن الموقف بديهى أكثر بالنسبة للكسوريات. عندما ظهر كتابـــه الأول منـــذ
أكثر من عشرين عامًا بعنوان المواد الكسورية، كان يعتقـــد أن بنـــواه مانـــدلبروه
Benoît Mandelbrot قد وقع فى الفخ بإنذاره بإعطاء تعريف للكـــسوريات. لـــم

---

(٥١) انظر النص المحاضرة ١٧٠ من جامعة كل المعارف التى ألقاها فى ١٨ يونيو ٢٠٠٠ إيف ماير فـــى هذا الكتاب.

ينجح فى إعطاء تعريفا جيدًا، لا يوجد. الكسوريات هى مادة الهندسة الكسورية فمثل الأشكال هى مادة الهندسة. نستطيع أن نعطى رؤية عن طريق أمثلة وتعليقات، ولكنه سيكون من التهور تحديد المجال بشكل دقيق. بالعكس من داخل المجال نستطيع أن نعطى تعريفات دقيقة.

هكذا أصبحت بعض الأشياء المعرفة تعريفًا كاملاً، أصبحت شعبية جدًا. إن سلم الشيطان ليس سوى ما اصطلحنا على تسميته أنا وسالم Salem دالة ليزج التى بنيت على فئة كانتور الثلاثية. لا شك أن المصطلح الجديد ناطقًا أكثر من القديم.

سأختم حديثى بذكر خيار للمصطلحات. فى الرياضيات نرث ليس فقط النظريات والطرائق ولكن نرث من الكل مصطلحات يجب أن نقبلها، فى إطار من التماسك ليست مسألة، إحلال مثلث وشكل رباعى بشكل ذى ثلاث زوايا، وأربع زوايا tetragone trigone، لتكون على نغمة polygone. هناك بعض التفكك فى اللغة، وليس لديها سوى الأضرار.

إن الكلمات لها ألوان متنوعة، تشارك فى صنع المشهد الرياضى. كلما توافقت الكلمات مع المفاهيم كلما كانت موحية. إن الالتفاف convolution ليست سيئة، "مويجة" جيدة، و"كسورية " جيدة جدًا، "سلم الشيطان " ممتازة. لقد أكد كل من بورباكى وماندلبروه بطرائق مختلفة، إن الرياضيات المعاصرة لديها همّ المفردات واللغة الرياضية.

هناك صيحات وميول فى خيار المصطلحات،. مثلاً، القرن التاسع عشر هو قرن الكلمات اليونانية، نحتفظ بها للخاصة: holomorphic هولومورفى (دالة تحليلية فى متغير مركب)، monodromie أحادى، homographic جناس، homologie تماثل، homomorphism تشاكل، تحويل طوبولوجى homeomorphism، تشوهى homotopic، حولية[٥٢] anallagmatique، إلخ.

---

(٥٢)يسمى حولية كل منحنى لا متغير عموما فى حالة قلبه. كلمة anallagmatique تعنى عدم التغير باليونانية allagma تعنى تغير.

إنها مصطلحات منفرة نوعًا، وليس لها قيمة إلا بتعريفها والاستخدام الـذى نجنيـه منها.

ظهرت فى بداية القرن العشرين مفاهيم جديدة وثورية فى بعض الأحيـان، ويبدو ان مفردات اللغة تترجم إرادة عدم ترهيب القدماء. إنه انفجار لـــ "تقريبًــا" و"شبه": "تقريبًا فى كل مكان" لـ لبزج، "شبه تحليلية" لهادامار Hadamard وبورل Borel، والدوال "شبه الدورية" لبول Bohl وإسـكلانجون Esclangon والـدوال "الدورية تقريبًا" لهارولد بور.

يعد بورباكى نموذجًا فى اسـتخدام اللغـة؛ معتـدلاً وواضـحًا، وكمؤلـف لمفردات، فى بعض الأحيان يعطى معنى رياضيًا دقيقًا لكلمات فرنسية مـن اللغـة المعاصرة، مثل جـوارات voisinages، مرشـح filtre، منـضغط compact، وأحيانًا يصيغ كلمات جديدة بدءًا من اللاتينية مثل, injective راسم أحادى من فئـة إلى أخرى أو إلى نفسها، Surjective راسم فوقى،غامر، bijective تناظر واحـد لواحد.

إن مفردات اللغة المعاصرة وبعكس مفردات بداية القرن، يبدو أنها قد أدانت الانقطاع عن الماضى حتى وان كانت ترثـه مباشـرة. إنهـا علاقـات اللايقـين incertitude، والدوال غير التفاضـلية والتحليـل غيـر الخطـى، والعـشوائية، والكوارث، والفوضى. كل هذه المفاهيم لها تعاريف رياضية دقيقة، ولكنها تجـذب خيال الجمهور إلى هوّة بلا قرار.لا فائدة من الإصرار علـى الـرنين بـين هـذه المفردات والاضطراب الاجتماعى فى نهاية قرننا.

إن بداية هذه المحاضرة قد تكون أعطتكم انطباع أن الرياضيات تنمو حسب منطقها الخاص، بخلق المفاهيم عندما تنضج، وتطويرها بلا حدود عنـدما تكـون ملائمة.العلاقة الوحيدة بالمجتمع التى ذكرتها هى الاتصال والتعليم. الشرك الأخير الذى سأذكره هو أن نظن أن الرياضيات مفصولة عن الحقيقة المجتمعية. فالاختبار البسيط لمفرداتها يبين لنا عكس ذلك. وفى كل الأحوال كل محاضرات هذه الدورة

عن الرياضيات، وكل المظاهر التي تحدد في فرنسا والعـالم عـام ٢٠٠٠ عـام الرياضيات، تبين أن الرياضيات لها جذور كلية الوجود في الحقيقـة الاجتماعيـة، وأنه جاء الوقت، حسبما أتى في إحدى توصيات عـام ٢٠٠٠،" أن نعمـل علـى إخراجها من الخفاء".

رياضيات واقتصاد[٥٣]

بقلم: إيفار إيكلاند

Ivar EKELAND

ترجمة: مها قابيل

ليس لدى الاقتصاديين تغطية صحفية جيدة فى فرنسا على حين يحظى الرياضيون بالاحترام العالمى، وهذا راجع لأن الاقتصاديين يعانون من سوء حظ مهنتهم التى تدور حول موضوع يفترض أن يكون لدى الجميع فيه كفاءة، بينما يقدم الرياضيون على أنهم الذين يتغلبون على "غير المفيد"، ويتمتعون بكل الود الذى يحيط بأبطال الفشل أو البحارة المتوحدين، باختصار كل الذين ربطوا حياتهم باستخراج الأشياء غير الممكن الدخول إليها والخاصة بالأموات، ولكن معروفة عالميًا بصعوبتها الشديدة. أنا لا أريد كدليل سوى هذه العريضة التى وجدت صدى كبيرًا لها فى الرأى عام، حيث كان بعض طلاب الاقتصاد يشكون من الطريقة التى كان يميل أساتذتهم إلى تعليمهم الاقتصاد من خلالها؛ لأنها شديدة النظرية فى رأيهم. فنتخيل مثلاً طلاب الرياضيات يشتكون من أن الرياضيات التى تدرس لهم مقطوعة عن الحقيقة، ويخاطبون الجمهور العريض بعدم كفاءة الأساتذة الجامعيين.

فى النهاية هذه ليست مشكلتى، بما أنى رياضى أتغنى من قلبى بأغنية Suave mari magno ولذلك سأحدثكم من وراء قلبى هذا المساء عن العلاقات التى تربط بين الرياضيات والاقتصاد ويبدو لى أن السبب العميق الذى يجب أن نسميه "عدم الفهم الفرنسى" للتقدم الضخم الذى أنجز فى علم الاقتصاد، وخاصة فى الثلاثين عامًا الأخيرة، هذا لأن الأشخاص الأكثر ثقافة لا يفهمون معنى النموذج. وأفهم هذه الكلمة على أنها تمثيل رياضى للحقيقة، وسأمكث نصف المحاضرة فى شرح هذا المفهوم: ما النموذج وكيف نستخدمه؟

---

(٥٣) نص المحاضرة رقم ١٧٥ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٣ يونيو ٢٠٠٠.

لا يوجد أفضل من المبدء بمثال، ولنأخذ جملتين طالما سمعنا عنهما هذه السنوات وهما:

- "أن المهاجرين يأخذون عمل الفرنسيين".
- "الوصول إلى ٣٥ ساعة عمل سوف يخلق وظائف".

من المؤكد أن هذه المزاعم لا تعبر عن جدل أكاديمي؛ حيث إنه ليس سؤالاً عن جنس الملائكة، ونستطيع أن نصنف الفرنسيين حسب موافقتهم على هذه الافتراضات، وأنني مستعد للتخمين أننا سنجد القليلين الذى يتفقون مع كليهما فى الوقت نفسه. فغالبية الفرنسيين ستكون قناعتهم مبنية بلا شك على حجج سياسية أكثر منها على رأى شخصى، ولكن هذا لا يمنع (خاصة بالنسبة لعالم) أن يطرح السؤال: هل هذا حقيقى؟ كيف يمكن أن نكوّن رأيًا شخصيًا ولا نرضى "بالأفكار الجاهزة" التى ينشرها حزبنا السياسى المفضل؟ ماذا يدور برأس هؤلاء الذين يتبنون الرأى المعاكس؟ ما القيمة الموضوعية لهذه القضايا بعيدًا عما تردده الشخصيات السياسية التى يمكن أن تنفرنا؟

هذان الزعمان يتحدثان عن الشىء نفسه: العمل. ما العمل؟ إنه ليس موضوعًا بسيطًا مثل المثلث والدائرة، تبعًا للتعريف الذى نفترضه، ووجهة النظر التى ننطلق منها، سنحصل على إجابات مختلفة جدًا، وسأعطى هنا ثلاثة أمثلة، تمثل هذا الموضوع نفسه، العمل، فى ثلاثة نماذج مختلفة.

النموذج الأول: العمل ككعكة نقتسمها

معظم الذين لا يتمتعون بثقافة اقتصادية يتوقعون أن كمية العمل المتاحة فى وقت معين هى معطى لا يتمدد: إنه عدد الوظائف الموجودة؛ فيوجد طلب كلى على العمل، متعلق باحتياجات الاقتصاد، لا يستطيع العرض أن يتعداها، فيما عدا استخدام الناس لحفر الأرض وردمها مرة أخرى، الذى ليس سوى أحد أشكال من البطالة المقنعة.

إذا تبنينا وجهة النظر تلك، وإذا كان العمل كعكة يجب تقسيمها ستكون الإجابات على أسئلتنا واضحة، إذا كان هناك الكثير من المدعوين، لن يكون هناك ما يكفي للجميع: كل عمل يأخذه مهاجر، هو عمل بالناقض للفرنسي، وبالعكس إذا قبل كل فرد بنصيب أصغر من الكعكة، نستطيع عمل المزيد من الأنصبة، وبالتالى الوصول إلى ٣٥ ساعة عمل يخلق بالفعل وظائف، ونستطيع أن نحدد كل هذا بمعادلة تعبر عن الكعكة، ومجموع أجزائها، أيًا كانت الطريقة التى نقسم بها.

النموذج الثانى: العمل يعتبر عاملاً فى الإنتاج

ليس ممنوع أن تكون لدينا رؤية أكثر كمالاً لماهية العمل، وأن نتذكر أنه أيضًا من عوامل الإنتاج. ما هو لصيق بالاقتصاد هو الإنتاج، وليس ببساطة استهلاك ما هو موجود فقط، ولكى ننتج يجب أن نعمل بشكل أو بآخر. بعبارة أخرى، الاقتصاد هو المحرك والعمل هو الوقود. الكل يعرف كيف يقود سيارة؛ للوصول بها لأقصى قدرة للسيارة يجب زيادة السرعة أى دفع مزيد من الوقود فى الموتور، وبالعكس إذا رفعنا قدمنا دون حذر، سنجازف بإيقاف الموتور.هذا يعطينا فكرة أولية عما يمكن أن تكون عليه السياسة الاقتصادية.

إنها كعكة، إذا أردنا، ولكن حجمها يتوقف على عدد المدعوين، فالمهاجر الإضافى، هو نقطة وقود زيادة فى الموتور، يجعله يدور أسرع ويكون إذن قادرًا على جذب شحنة أكبر. ومن المحتمل جدًا أن يسمح الإنتاج الإضافى الذى يصدر عن هذه الزيادة ليس فقط للمهاجر بالعيش هو وأسرته، ولكن بإعطاء المزيد للموجودين من الأصل فى سوق العمل.إذن الهجرة ستكون مفيدة لجميع الفرنسيين والمهاجرين. والوصول من ٣٩ إلى ٣٥ ساعة عمل يمكن أن يسوقنا بالعكس، إلى فجوة تزيد أهميتها النسبية عن ٣٩/٤ فى الفترة الأولى.وحتى لو كان العاطلون هناك كبديل، وردوا كمية العمل فى الفترة الثانية للمستوى الأصلى، سيكون هناك طور انتقالى يصعب استيعابه.

نجد أننا نقع اليوم فى مشكلات ذات طبيعة مختلفة عن المثال السابق، حيث إن سير الاقتصاد يتأثر بشكل مركب بكمية العمل التى تضخ فيه، وسنعرض هذا الموقف بمعادلات من نوع العرض = الطلب، والتى تعبر عن أن الاقتصاد يدور بالضبط بالسرعة التى تسمح للمستهلك (وبشكل نهائى للعمال) بامتصاص كل الإنتاج. إن تأثير سياسة الهجرة أو اختزال وقت العمل يتوقف كثيرًا على التوازن الذى تصل إليه.

النموذج الثالث: العمل منتج

فى هذا النموذج لم يعد العمل معطى غير مميز، وإنما منتج يمكن تصنيعه بكميات ونوعيات مختلفة حسب الحاجة. إن الفاعلين المختلفين فى الاقتصاد يديرون عرض العمل على مدار الوقت، والمرء يختار مستوى تعليمه العام وتكوينه المهنى بشكل يعظم عرضه للعمل أثناء سنوات نشاطه، ويختار أيضًا مستوى ادخاره استعدادًا لفترة التقاعد، والمؤسسات تختار استثماراتها آخذة فى الحسبان الحالة المتوقعة لسوق العمل ومستوى تكوين الأفراد؛ فمصانع النسيج تختلف فى تصنيفها عن الشركات المالية. ويختار المجتمع مستوى الاستثمارات العامة خاصة فى التعليم، ونظم إعادة توزيع الدخل.

إذن عرض العمل فى لحظة ما هو نتيجة لعدة قرارات تم اتخاذها، على كل مستويات الاقتصاد، فى سنوات سابقة، وفى بعض الأحيان تعود لزمن بعيد مضى: أن إذا أتخذ اليوم قرارًا بعمل دراسات طبية، أو أن تقرر رينو Renault أن تبنى مصنعًا فى البرازيل، فإن أثر هذه القرارات لن يظهر إلا بعد سنوات. كذلك المهاجر اليوم سيكون لديه أطفال يتلقون تعليمًا أفضل من ذلك الذى تلقاه هو، وسيدخلون فى أماكن أخرى فى سوق العمل، والعبور إلى ٣٥ ساعة عمل يمكن أن يدفع المؤسسات إلى البحث عن مكاسب إنتاجية بتحسين الماكينات الموجودة بدلاً من تشغيل المزيد من العمال. باختصار إن الأسئلة المطروحة ليس لها إجابات

بسيطة وبديهية، فكثير من العوامل تدخل فى الحسبان، ومن هنا يأتى دور النمذجة، أى التعريف الدقيق لكل هذه العناصر وحل المعادلات التى تربط بينها.

أى درس نستخلصه من الأمثلة الثلاثة؟

أولاً: الفائدة من النمذجة الرياضية، حيث إنها تسمح بإعلان الفروض التى تؤسس الفكر، والتى تبقى غالبًا ضمنية فى التعبير الأدبى، فالذين يعتقدون أن المهاجرين يأخذون مكان الفرنسيين، يعتقدون أن الطلب على العمل يبقى دائمًا ثابتًا، ولكنهم لا يقولون ذلك.تسمح النمذجة أيضًا بالتأكد من التماسك المنطقى للملحوظات المعروضة مع الفروض: إذا كنتم تعتقدون حقًا أن الطلب على العمل ثابت، فيجب أن تعتقدوا أيضًا أن المهاجرين يأخذون عمل الفرنسيين، والمرور إلى ٣٥ ساعة سيخلق وظائف.وتسمح النمذجة فى النهاية بالسيطرة على التعقيد: فى النموذجين الأخيرين، حيث يصعب جدًا التعبير عن التفاعلات شفهيًا وتسمح كتابة المعاملات بتوفير كبير فى الفكر، وإذا كان حل هذه المعادلات ممكنًا فسوف تعطى إجابة عن السؤال المطروح.

وبالتالى فإنه لا يوجد نموذج فائق، نموذج دقيق ومضبوط يشمل كل النماذج الأخرى، ويلتصق تمامًا بالأشياء. نجد أن النموذج الثالث أفضل من الأول، ولكن ليس ممتاز فى حد ذاته، من الضرورى أن يكون النموذج جزئى وغير كامل، وهذا لا يعنى أن كل النماذج تتكافأ. إن عمل رجل العلم سواء كان فيزيائيًا أو اقتصاديًا يحض على إيجاد النموذج الأكثر ملائمة فى تطبيقه على وضع معين. لنأخذ مثالاً أذكره كثيرًا، أن الأرض ليست كروية بالنسبة لكل الناس، فبالنسبة للرحالة الذى يستخدم الخريطة بمقياس 25/1000 من IGN تعتبر الأرض مسطحة: إنه لن يسافر وفى حوزته كرة أرضية موضوعة فى حقيبة ظهره! أما بالنسبة للطيار الذى يقوم برحلة من باريس إلى نيويورك فإنه يرى الأرض كروية: مما يحدد الطريق الذى يسلكه، وهو ليس أقصر الطرق إلا لو كنا على كرة. وبالنسبة للفلكى الذى يحدد

مكان القمر، أو مكان قمر صناعي، الأرض ليست كروية ولكنها مفلطحة عند الأقطاب ومحدبة من الوسط، وعدم الانتظام هذا يؤثر على المسار الذى يحسبه الفلكى.

إنها الدروس نفسها التى طبقها الفيزيائى منذ ثورة جاليليو، ولكن النماذج الرياضية المستخدمة فى الاقتصاد مختلفة عن تلك المستخدمة حتى الآن فى الفيزياء من المؤكد أن النظرية الاقتصادية تبنى المجتمع بدءًا من الفرد، مثل النظرية الفيزيائية التى يبنيها الجسم الصلب بدءًا من الذرة، إن كل منهما تقترح شرح ظواهر جماعية عن طريق السلوك الفردى. ويختلف فيه الإنسان عن عناصر الفيزياء فى جوانب أساسية والتى يجب أن تنتبه لها النماذج الرياضية، والتى لن نعرض منها هنا غير عدد قليل.

التعمد (القصدية)

إن الكائن البشرى يتصرف بوعى، أى أنه يتصرف تبعًا لهدف يريد أن يصل إليه. لفهم معنى ذلك، يكفى أن نتخيل أن حريقًا اشتعل فى هذه الغرفة، إذن سيهرب الهواء الساخن والدخان من الأبواب والشبابيك، والذى أراه فى أعلى المدرج وأنتم أيضًا ستخرجون، ولكن لأسباب أخرى، إن المسالك الجماعية الناتجة مختلفة: حيث إن جزيئات الهواء لا تصاب بالذعر.

السلوك الاستراتيجى:

أعلم أنك مثلى، وسأستخدم ذلك لأتوقع ما يمكنك فعله، باستخدام هذا المفهوم يمكن أن نلعب الشطرنج: أضع نفسى مكان خصمى لأتوقع رد فعله للدور الذى ألعبه، فى عدد من المواقف الأكثر تعقيدًا والأكثر واقعية، لا يجب أن يفوتنا أن ندمج ردود أفعال الخصوم (أو الشركاء) على قراراتنا الخاصة، مع تذكر أنهم يفعلون الشيء نفسه.

لا تماثل المعلومة:

لنأخذ كلمة مشهورة من جون دون John Donne، والتى وضعها هيمنجواى فى صدارة كتابه "لمن تدق الأجراس؟"، إن كل كائن هو جزيرة: تتصل الجزر ببعضها عن طريق الإشارات، ولكنها لا تتحرك، بشكل آخر يمكن أن تسمع ما أقول، وترى ما أفعل، وتقرأ ما أكتب، ولكنك لن تعرف أبدًا ما أفكر به، كل إنسان ممكن أن يكذب فى نواياه، وإمكانياته، وقليل من الناس من يمنعون أنفسهم.

استعارت النمذجة النقاط السابقة، مما نتج عنه تقدمًا فى الرياضيات، حيث استفادت من المفاهيم الحديثة، أشهرها بلا شك التوازن، والذى يرجع الفضل فيه إلى جون ناش، رياضى استثنائى تحكى قصته الحزينة فى ببليوجرافيا حديثه. فى إطار هذا العرض لن نغامر بالدخول فى هذا الموضوع، سنطرح سؤالاً آخر مهمًا أيضًا، ومثيرًا للجدل، وهو سؤال عن التحقق التجريبى.

بأى مقياس يمكننا القول إن نموذجًا ما صحيحًا؟ هذه المسألة تمت دراستها طويلاً، ومن ناحيتى أضع نفسى فى المتطوعين تحت لواء دائرة فينا، وأكثر تحديدًا تحت لواء كارل بوبر، والذى لن تكون النظرية العلمية صحيحة تبعًا له، إلا بشكل مؤقت، فى انتظار تفنيد سنتفنن فى إظهاره، بالإكثار من التجارب الهادفة إلى التحقق من النتائج البعيدة أكثر فأكثر. بدقة أكثر النظرية الفيزيائية لن توصف على أنها علمية، إن لم يكن لها نتائج قابلة للاختيار، مما يعنى أنه إذا كان التطور الرياضى للنموذج، الذى تفرضه النظرية لا يقود إلى توقعات يمكن أن نواجهها فى الحقيقة، فستكون نظرية غير علمية. إننا لا نعرف بشكل كافى أن المعيار نفسه للعلموية ينطبق على الاقتصاد. بناء نموذج هو لاشىء: أى شخص يمكنه عمل ذلك، ونقاشات المقاهى مثل مواضيع الجرائد مصنوعة من نماذج لا تساوى أكثر من الوقت الذى نقضيه فى سماعها أو قراءتها. أما الصعب فهو تأييدها أى استنتاج المزيد من النتائج المنطقية غير المنظورة، والذهاب للتأكد ما إذا كانت تحققت على الأرض.

هذا التحقق هو دور الاقتصاد القياسى économétrie، والحصول على آخر جائزة لنوبل فى الاقتصاد من قبل اثنين من رجال الاقتصاد القياسى يؤكد أهمية ربطه بعلم الاقتصاد الحديث.

كنت أريد دون أن أستفيض إعطاء مثل هذا النوع من التحقق، المأخوذ من عمل حديث لشيابورى Chiappori وليفيت Levitt.

إن نظرية الألعاب هى إحدى فروع علم الاقتصاد؛ حيث إنها تدرس سلوك شخصين عقلانيين جدًا فى حالة صراع. من التقليدى عند عرض الموضوع الاستعانة بمثال ضربة الجزاء فى كرة القدم يندفع حارس المرمى إلى اليمين أو اليسار فى الوقت نفسه الذى يرمى اللاعب فيه الكرة التى تذهب بسرعة أكبر من أن ينتبه ليرى فى أى تجاه تذهب. إنه يجب أن يقرر مسبقًا فى أى جانب يقفز، وكذلك الرامى الذى يقرر مسبقًا فى أى جانب يضرب بالكرة، هكذا نصل لموقف تقليدى فى نظرية الألعاب. إن اليمين واليسار لا يلعبان الدور نفسه، تبعًا لكون الرامى أيمن أم أيسر، وسنتحدث إذن فى الجانب الطبيعى الذى هو الأيسر إذا كان الرامى أيمن، والتحليل النظرى يقودنا إلى نتائج نوعية، الأهم ألا يستطيع أى من الحارس والرامى تحقيق أى شكل من الانتظام يجعلهما مكشوفين لتوقعات الخصم، فالحارس يقفز دائمًا من الجانب الطبيعى.من وجهة نظر رياضية هذا غير المتوقع يتم نمذجته عفويًا، ونقول إن الرامى يقفز من الجانب الطبيعى بتردد P، والحارس يقفز من الجانب الطبيعى باحتمال q، يبقى كل ذلك كيفيًا ونستطيع أن نصل إلى النتائج نفسها دون عمل رياضيات، ولكن يأتى الآن الجانب الكمى:

ما النسبة بين p، q ؟ هى تساوى p=q ؟ إن لم يكن فأيهما أكبر؟ يبقى الحدس صامتًا، ولكن يعطينا التحليل النظرى نتيجة p<q، p أصغر من q، يبقى أن نعلم إن كانت هذه الإجابة صحيحة. إن كانت كذلك، فتعزز نظرية الألعاب.وإن لم تكن فقد ألغيت. بتطبيق ذلك على كل ضربات الجزاء التى جرت فى بطولة التقسيم الأول، فى فرنسا ١٩٩٩-١٩٩٧ وفى إيطاليا ٢٠٠٠-١٩٩٧ التى كان عددها ٤٥٩ وتحققت المتباينة p<q وكذلك بعض المعايير الأخرى التى لم أذكرها هنا.

إننا نأخذ على النظرية الاقتصادية أنها غير واقعية؛ لأنها تفترض من الأشخاص أنهم عقلانيون وحاسبون. بالإضافة إلى ذلك فإن هذا الافتراض صحيح قطعيًا على مستوى المؤسسات ولكنه لا يجب أن يكون صحيحًا على مستوى الأفراد؛ لكى تكون النظرية صحيحة. إن العقلانية يمكن أن تدخل عن طرائق أخرى غير مباشرة، مثل التعلم أو الداراوينية لنرى ما يحدث هنا، إن الموضوع لا يخص الحياة أو الموت ولا مصير بلد ولكن المجازفة الاقتصادية ليست أقل أهمية للأشخاص المعنيين: إن آخر كأس فازت به فرنسا كان عن طريق ضربة جزاء، وهذا يمثل بالنسبة للمنتصرين (الخاسرين) بمفهوم الشهرة والاشتراك فى الكؤوس الأوروبية مكسبًا (خسارة) يترجم بالأرقام إلى عشرات الملايين من الفرنكات.

إن اللاعب أو حارس المرمى يعتبران محترفين، يتدربان على الدوام وتكون لديهم رؤية للخصوم، ويمكن أن نكون متأكدين أنهم وقت ضربة الجزاء قد فكروا فعلاً فيما يجب فعله، وفعلوا بالضبط ما تنبأت به النظرية! لماذا؟ إن أى من بارتيز Barthez أو زيدان لا يعرف نظرية الألعاب، وسيكونان بالتأكيد أقل اقتناعًا بالشكليات الرياضية. لماذا إذن يسلكان مثلما يسلك شخص عقلانى وحاسب؟ توجد عدة إجابات ممكنة كلها مهمة: الأولى أنهما يصلان إلى النتائج نفسها بتفكير غير شكلى: الكائن البشرى عقلانى، يتصرف بشكل يعكس الفكر، ونظرية الألعاب تعتبر إنجازًا لأنها تضع نموذجًا لهذا النوع من السلوك.

الثانية: إن التجربة علمتهما على مر السنوات، أن ذلك هو بالضبط ما يجب فعله، فى هذه الحالة ليس السلوك الشخصى هو الذى ينمذج نظرية الألعاب، ولكن النتيجة النهائية للتعلم، وعلى مستوى النتيجة تقع العقلانية. الثالث: إن اللاعبين لا يفكرون ولا يتعلمون شيئًا، ولا يفعلون سوى التعبير عن الخصال الدفينة، والسلوك المكتوب فى جيناتهم: إن كان بارتيز حارس مرمى جيد ذلك لأنه يفعل فطريًا ما يجب فعله.إذن فالمنطق هنا داروينى: فلأن بارتيز كان كذلك كانت نتائجه أفضل من نتائج الخصوم، ووصل إلى القمة.

كنت أود أن أنهى هـذا العـرض بالحـديث عـن الهندسـة الاقتـصادية والاجتماعية، وبالإشارة إلى المكانة المتنامية التى تأخذها المؤسسات فـى حياتنـا اليومية، والتى هى ثمرة النظرية الاقتصادية. ولكن المكان لا يكفى، وسأتوقف هنا، مع شكركم لاهتمامكم.

الأعداد والكتابة[٥٤]

بقلم: جيم ريتر

Jim RITTER

ترجمة: مها قابيل

قصتى الشخصية مع المسألة التى سوف أطرح هنا بعضًا من جوانبها – وهى الرياضيات والكتابة – ترجع لحوالى ثلاثين عامًا عندما كنت طالبًا فى الرياضيات والفيزياء النظرية فى لندن، ولقد قبلت أن أسجل نصوص رياضية لزميل يكاد يكون أعمى، وكانت مفاجأتى الكبيرة ولأول مرة فى حياتى ملاحظة أنه من الصعب جدًا قراءة الرياضيات بصوت عالٍ. وهنا مثلاً مقطع من إثبات رياضى (*شكل ١*). والذى يوجد فى كتاب نشر فى ذلك العصر. فى مواجهة ذلك التعقيد، قام ناشرو الكتاب بالمعالجة الطبوغرافية وذلك كرسم توضيحى دون عنوان، غير أن المقصود هو جزء مكمل من النص والذى يعتبر مهمًا لتتابع البرهان.

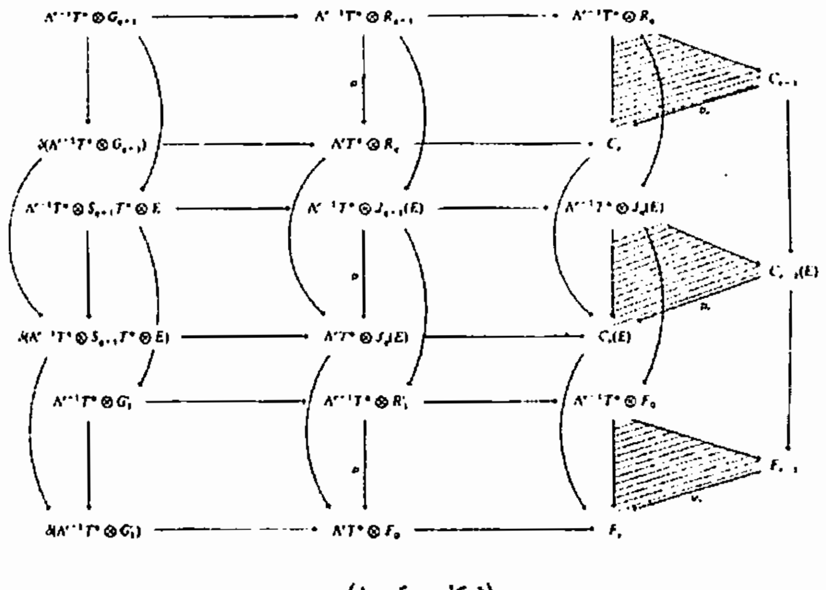
أما بالنسبة لى لقد اكتشفت فى تلك المناسبة، أن هناك فى رأيى شيئين بديهيين: الأول هو أن القراءة والكتابة ليسا نشاطين متبادلين ولكن مختلفان جذريًا. الثانية، أن النص الرياضى يختلف كل الاختلاف عن النص الخيالى.[٥٥] وبدقة أكثر، فإن الكتابة ليس لها تكوين لغوى جوهرى، وإنما هيئة حاسمة عندما نهتم بالجوانب المعرفية.

---

(٥٤)نص المحاضرة رقم ١٧٦ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٤ يونيو ٢٠٠٠.

(٥٥)لقد لعب الأدب حتمًا فى بعض الحالات دورًا فى إمكانية رسم الكتابة. يمكن ايجاد أمثلة متنوعة من مختلف العصور فى كتالوج معرض Poésure et peintrie بمتحف مارسيليا، ١٩٩٣.

فى المقابل فإن الكتابة والرياضيات وبالأخص الكتابة والأعداد تربط بينهمـــا روابط قوية جدًا، ومثال مبدئى هو الكسور وإن كـــان تطورهـــا صـــعبًا وطـــويلاً تاريخيًا وفكريًا.



(شكل رقم ١)

جزء من إثبات لنظرية ٣/٥ فى كتاب بوماريه Pommaret الذى صدر عام ١٩٧٨ص ١٨٥ [بتصريح من الناشرين جوردون وبريتش]

كتابة الكسر العام p/q كانت تعنى فى البداية عملية قسمة لا يمكن إتمامهـــا (فى بعض الحالات لا يمكن إتمامها بالشروط المقبولة لكتابة الأعـــداد مثـــال؛ لأن كتابة الناتج لابد أن تكون منتهية).[٥٦] نشير إلى أن كتابة كهذه تخـــالف بوضـــوح الخطية كما هو الحال فى العادة فى حالات الحساب، وهى تعزل فى فراغ الصفحة هذه العملية كموضوع جديد والتى نستطيع معالجتها بإدخالها هى نفسها فى عمليات ومعالجتها هى نفسها كعدد.

---

(٥٦)حكاية هذا التطور موجودة فى Benoît et al.1992.

وشكل آخر لأهمية الكتابة فى الرياضيات وهو التوحيد الذى يمكن للكتابة أن تقدمه بين الظواهر، والأشياء والمجالات التى كانت تعالج حتى ذلك الوقت على أنها مختلفة عن بعضها. ومثال كلاسيكى وهو الجبر الرمزى، الرمز يمثل فى البداية عددًا مجهولاً نبحث عنه. ولكن يعرض فيما بعد احتمالية كتابة قيم مختلفة بالطريقة نفسها (خارجة من نطاق الحساب) وقيم مستمرة ترجع إلى مجال الهندسة. إن النتائج متعددة وفى اتجاهات مختلفة، وأسئلة جديدة تظهر، (هل من الممكن تأسيس نظرية حسابية للقيم الجبرية عمومًا ونطور فيها مفاهيم مثل الأرقام الأولية؟ هذا يطرح سؤالاً حاسمًا فى تطوير الرياضيات فى آفاق تكوين القرن التاسع عشر)؛ أيضًا يتاح لنا تمثلات جديدة وبالتالى حدس جديد للأشياء الرياضية المتاحة.

وبالعكس، إذا قارنا مثلاً هاتين الكتابتين الأخيرتين من $\sqrt{7}$، وتطور الكسور العشرية وتطور الكسور الاعتيادية المستمرة: مثلاً

$$\sqrt{٧}=٢,٦٤٥٧٥١٣١١٠٦٤٥٩٠٥٩٠٥٠١٦١٥٧٥٣٦٣٩٢٦٠٤٢٥٧١٠٢٥٩$$

$$\sqrt{٧}=٢+\cfrac{١}{١+\cfrac{١}{١+\cfrac{١}{١+\cfrac{١}{٤+\cfrac{١}{١+\cfrac{١}{١+\cfrac{١}{١+\cfrac{١}{٤+\dots}}}}}}}}$$

يجذب انتباهنا الفرق ما بين عدم انتظام الأرقام المتوالية التى تدخل فى التطوير (التجذير) العشرى، وانتظام الشكل الثانى للكتابة. التعاقب الصارم لـ١ و٤

يسمح لنا فى هذه الحالة بالتنبؤ فى كل مرحلة ببقية التعبير الرياضى مما يحفز على التساؤل حول خصائص الأعداد التى لها مثل هذا التجذير الدورى.

ويطرح كل تمثيل خاصية مختلفة يتعين اكتشافها وتميل العديد من أنماط الكتابة إلى أنواع مختلفة من التجذير التى كانت فى البداية شيئًا واحدًا فلا تلبث هذه الأنماط المختلفة أن تدمجه (هذا الشيء الواحد) فى مجالات مختلفة وتطرح عليه أنواع مختلفة من الأسئلة. توحد الكتابة أو على العكس تفرق وتستطيع بهذا أن تساهم فى خلق ديناميات جديدة للرياضيات. فهى تعتبر ممارسة للفعل وفى الوقت نفسه ممارسة للعرض.

وأود أن أختبر فيما يلى تجميع هذه الجوانب المختلفة فى موقف محدد بحيث يمكننا متابعته على المدى البعيد فيما يقرب الألف عام. ما سوف أتناوله بالوصف يعتبر أحدث ما فى البحث؛ لأننا لم نبدأ فى فهمها إلا منذ عشرين عامًا فقط بفضل الإسهامات الدولية والعمل العابر للتخصصات والذى تطلب الاعتماد على موارد قوية فى مجال المسح الرقمى والمعلوماتية.

يبدو مناسبًا أن نهاية التجذير على الأمد البعيد هو عام ٢٠٠٠ تقريبًا. وخشية أن أخيب ظن قرائى، أريد أن أصرح أن الـ ٢٠٠٠ المقصودة هى كما نقول فى الرياضيات لأقرب إشارة. وتوضيحًا فإن الـ (٢٠٠٠) هى ٢٠٠٠ ما قبل الميلاد. أود إعادة بناء العلاقة المتداخلة واللصيقة ما بين نشأة الكتابة فى بلاد ما بين النهريين وبين شيء أساسى جدًا للرياضيات والذى اعتبره الرياضيون طبيعيًا أو هبة من الله، وهو العدد الصحيح "المتضمن فى العمليات الحسابية". قد تبدو نتيجة العملية التى سوف أقوم بوصفها أولية، فإن دراسة هذه العملية توضح ظواهر عامة لها أهميتها.

أود أن أتوقف عند فكرة "جامعة" لكل المعارف محاولاً توصيل ليس فقط خلاصة الأبحاث، بل المنهج نفسه الذى يحركها، أن أعطى فكرة عن مشكلات علماء الآشوريات ومؤرخى ومؤرخات العلوم فى تناولهم للنصوص الجزئية

والمبتورة التى بين أيدينا. الأمر يتطلب شيئًا من الصبر من قبل القراء، بل وأكثر من ذلك أن يتحلوا بالفضول لتلقى الرسائل اليومية التى تركها لنا أناس منذ أربعة آلاف سنة.

ميلاد الكتابة والعدد ٣٢٠٠-٢١٠٠ ق. م

بدايات الكتابة

لم تكن الكتابة تدون من اللغة الناطقة فى أول مراحلها، بل ظهرت مثل مذكرة خادمة لحفظ رسم الأرقام والأشياء المستخدمة في الصفقات التجارية.

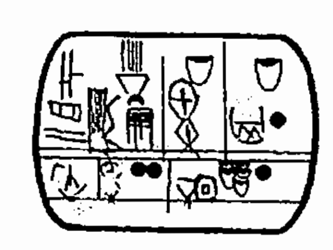
إن البداية الآن معروفة جيدًا،(٥٧) كرات طين مجوفة مملوءة فيش تمثل خيرات أخذت هذه القطعة الطينية فى التسطح تدريجيًا على مر العصور وكانت علامات القطع المعدنية مغروزة على السطح تحل محل القطع نفسها رويدًا رويدًا، تشكل بذلك أول خطوط الكتابة. ولكن قصتى التى لم تعرف بعد جيدًا، تبدأ بعد ذلك، عندما بدلت الفقاعات بالألواح المسطحة وعلامات الفيش بخطوط مرسومة بأقلام البسط (البوص)، ويبدو تحليلاً منظمًا أو كاملاً لأنظمة علم القياس والأوزان المستخدم ممكنًا، يسمح بمتابعة بالتفصيل تشابك تطور الكتابة والعدد. نشهد إذن تفوق الكتابة على الرياضيات بألف سنة: فإذا كانت الكتابة قد ظهرت فى البداية كأداة لخدمة تحديد الكم، فإن بعض هذه التطورات ظهرت لها نتائج تقنية وإدراكية مهمة على الرياضيات.

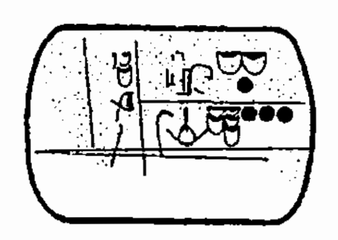
لقد وجدنا الكتابات الأولى بداية فى بلاد ما بين النهريين فى المركز الحضرى الكبير الذى تقع فيه مدينة Uruk **الوركاء** القديمة نحو ٣١٠٠ ق. م، ثم فى مدينة جمدت نصر وفى النهاية، فى مدينة أور. فى **الوركاء** القديمة مثل أى موضع آخر تفيد تلك الكتابة لهدف: تسجيل الإنتاج وتوزيع الخيرات، أو المحاسبة.

---

(٥٧)يمكن الاطلاع على Nissen 1994 et al.

ولقد وجد حوالى ٨٥% من ٣٩٠٠ لوحة فى الوركاء عبارة عن نصوص محاسبية، والـ ١٥% الباقية هى عبارة عن قوائم تحمل إشارات مقسمة إلى مواضيع (أسماء المهن، المدن، النباتات، وهكذا...)، ولقد استخدموها فى التعليم.ومن ضمن هذه المقالات المنشورة فى الوركاء القديمة توجد حوالى ٥٠ لوحة وقطعة تمثل أرشيف لقطعين من الخرفان (شكل ٢). وإليكم مثل نموذجى بالوجه (الجانب الأمامى) على اليمين والعكس (الجانب الخلفى) على اليسار.





شكل (٢)

لوحه لقطيع من الخرفان W 20274.3

فى مدينة الوركاء القديمة (نحو – ٣٠٠٠)، (d'apres Green ١٩٨٠: ص ٢٢)

وسوف نلاحظ أنه يوجد نوعان من الإشارات المسجلة أو المنقوشة لكشوف حساب شديدة الاختلاف. إن التنوع بسيط، يكمن فى الطبع الذى يتركه القلم المستقيم المقطوع والمغروس فى الطين، تاركًا مثل علامة ولتكن دائرة، وعلامة حز وهذا يكون فى مقاسين لطولين مختلفين.

أنا أسمى تلك الإشارات إشارات عددية؛ لأنها فى الحساب تخدم تحديد كمية المعلومات.

النوع الآخر من الإشارات أكثر تعقيدًا فى أغلب الأحيان يكون رسم تصويرى يحتوى على منحيات ومستقيمات. تلك الإشارات غير العددية مرسومة بقلم مسنون تخدم فى تحديد هوية الشىء أو تحديد كمية الخير.

بسبب التجانس النسبى لهذا الأرشيف، فإنه من السهل تحديد تركيبة اللوحات. أربع خانات على الوجه وكل واحدة تحمل اسم نوع من الخرفان المميزة فى السن والنوع، مقترن بالكمية (#): فى الجهة العكسية خانتان تعطيان مجاميع الخرفان البالغة والحملان من النوعين.

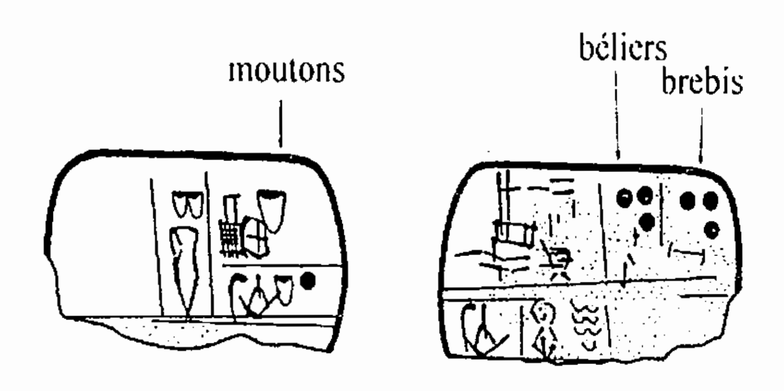
الوجه

# نعاج	# كباش	معلومات إدارية	
إناث الحملان (رخلات)		# حملان	# سن سنة

معكوس

# خرفان	منتجات ألبان	
# (حملان) سن سنة		

حقيقة أن اللوحات تحتوى على مجاميع مفردات تسمح لنا بتأسيس علاقات بين الإشارات العددية. تلك الإشارات منظمة بطريقة "جمعية "بمعنى أننا نكرر الإشارة عدة مرات حتى نصل إلى عدد أقصى من التكرارات نسجل بعده إشارة أخرى، والتى تناظر فى الترتيب قيمة عظمى. كذلك فإن أحد لوحات الأرشيف توضح لنا المفردات والمجموع الآتى: (شكل ٣)



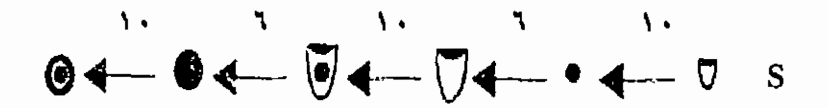
شكل (٣)

لوحة لقطيع من الخرفان W20274.74 لمدينة الوركاء – (نحو ٣٠٠٠ -٠).

عن Green ١٩٨٠: ص٢١

من الواضح أن فى هذا النظام الرقمى المستخدم فى عد الخراف ٦ ● يساوى ١ ▽.

من الممكن التصرف هكذا على عدد كبير من لوحات **الوركاء** التـــى هـــى حصر لحيوانات، ويستخدم النظام الخاص نفسه بعلم القيـــاس والأوزان فـــى كـــل الحالات وأعطى له علماء الأشوريات العلامة " s" وهو يعمل تبعًا للشكل الآتى:



الوحدات مرتبة ترتيبًا تنازليًا، يحدد الرقم أعلى كل سهم الكمية التى تحتويها الوحدة على شمال السهم من وحدات أقل (على يمين السهم)

مثال: ١٠ ▽ تساوى ١●.

هناك تحاليل مماثلة لنصوص أخرى تسمح باكتشاف الأنظمة الخاصة بعلـم القياس والأوزان مجتمعة مع قياسات الطول، وقياسات الأسـطح وقياسـات سـعة الحبوب. الأول، وهو مقياس أطوال، يبدو مطابقًا للنظام "S" ولكـن، وهـو نقطـة أساسية، استخدمت "نظم أخرى" لخيرات أخرى.[٥٨] المساحات، مثلاً تقاس بنظـام آخر كليًا يسمى النظام "G":

G ← ٦ ← ١٠ ← ٣ ← ٦

ويستخدم في قياسات سعة الحبوب نظام قياسات آخر يسمى ŠE:

ŠE ← ١٠ ← ٣ ← ١٠ ← ٦

والقائمة لم تنته!

على الرغم من تعدد الأنظمة الخاصة بعلم المقياس والأوزان، فإننا نرى أن ذخيرة الإشارات العددية صغيرة بشكل مفاجئ مقارنة بالعلامات غير العددية (أكثر من ٨٠٠) التي تمثل الخيرات والأشياء.ومثلما قلت من قبل، إذا كانت الإشـارات غير العددية مرسومة بقلم مسنن، فإن العلامات الرقمية نفسها مطبوعة في الطـين اللين بمساعدة قلمين (بأطوال مختلفة)، مقطوعين باستقامة، كل واحد منهما يـوفر

(٥٨)لتوضيح بشكل أمين هذه النظم المختلفة، من الضروري طرح متسلسلات طويلة من نـصوص الأوزان والقياس قبل دراستهم بشكل نمطي، والذي لم يبدأ سوى في عام ١٩٨٠، كنا نجهل وجود هـذه الـنظم المتعددة. فكثير من التمثيلات (إعادة البناء) تكون فرضية لنظـام وحيـد لـلأوزان والقيـاس سـاري المفعول. فإن ذلك له نتائج مهمة لفهم تطور مفهوم العدد كما سنرى.

فقط إشارتين مختلفتين: دائرة (الطرف الدائرى للقلم) حز (طرف مغروس مائـل) والذى يعطى مجموع أربع إشارات، أو بالأحرى سبع لأن بعض التركيبات مسموح بها.

غير أنها، وعلى الرغم من أن العلامات نفسها تظهر فى كل أنظمة القيـاس والأوزان، فإن قيمتها إلى حد كبير مطلقة أكثر منها نسبية، وتشكل علـى حـسب النظام، مثلما نراه أيضًا على الرسم التخطيطى. تمثل الدائرة الصغيرة قيمة أعلـى ١٠ مرات من قيمة الحز إذا كنا نحسب أطوال، ولكن ٦ مرات فقط إذا كنا نحسب حبوب القمح. إن الدائرة الكبيرة تمثل وحدة أكبر من تركيبة الكبيـر والـصغير إذا كنا نقيس مساحة الحقل، والعكس إذا كنا نعد النعجات.

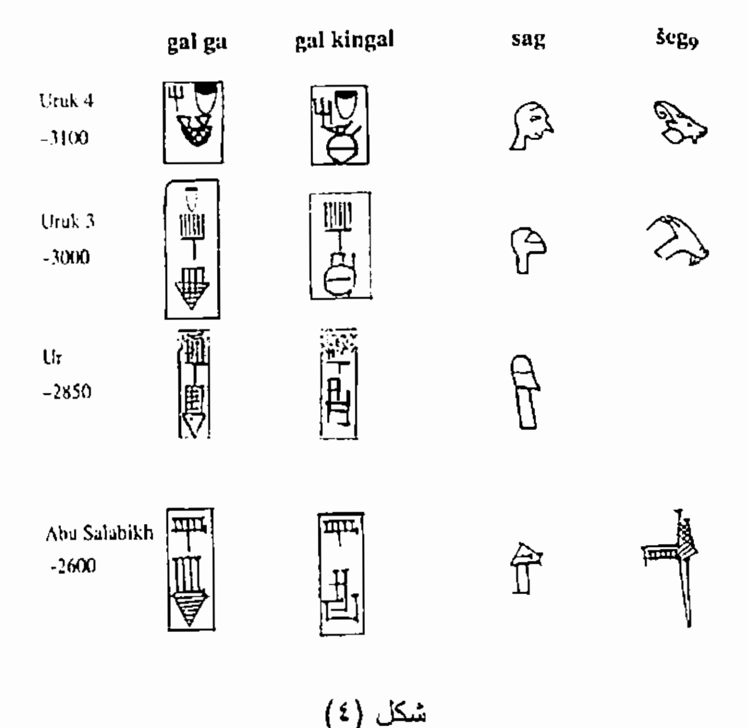
اختصارًا فى تلك المرحلة "لم تطرح أعداد مكتوبة" كأعداد فى حـد ذاتهـا بقيمة جوهرية، الموجود منها هو تدوينات مكتوبة لأعداد الآحاد، التى تعتمد قيمتها ونسبتها بشدة على الخيرات المقصودة.

المرحلة القديمة للأسر

خلال المرحلة التالية من (٢٨٠٠ إلى ٢٣٥٠) انتشرت الكتابة فى كل مـدن دول بلاد ما بين النهرين، وقد اتسم هذا التطور بالـصفتين الأساسـيتين الآتيتـين: **أولاً**، سوف نكتشف إمكانية استخدام الأداة الجديدة ليس فقط للمعلومة المحسوبة بل أيضًا لتسجيل أصوات اللغة المنطوقة. فإنه بدءًا من هذا الوقت ظهـرت تـدوينات تأريخية، ونصوص دينية، ورسائل استخدمت فيها الإشارات بقيمتها الصوتية، تعيد تشكيل اللغة من خلال الكتابة (فى هذه الحالة، السامرية)، ومع اتباع هـذا الأثـر، نستطيع أن نصل إلى الأدب، ولكن عن القصة (الأخرى)، لن أتكلم.

الارتقـاء الثـانى هـو، التغيـر فـى شـكل الإشـارات، "مـسماريتها" cunéiformisation (أى جعلها على شكل مسمار). إن الصعوبة الفيزيائية لرسـم المنحنيات المستمرة فى الطين، والوقت اللازم لذلك، يسبب التغير الأول فى الكتابة

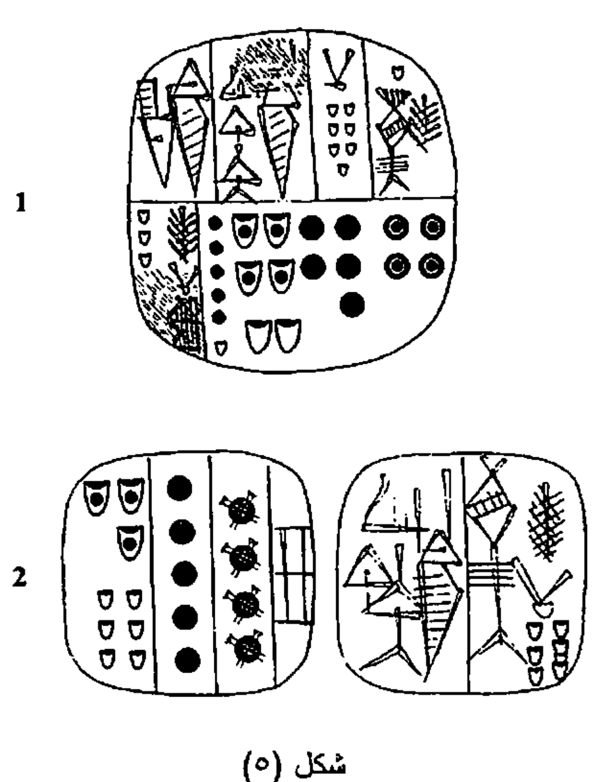
القديمة. لم يؤثر التعديل فى البداية إلا فى الإشارات غير العددية، بما أن الإشارات العددية تم تكوينها بطرائق مختلفة تمامًا مثلما رأينا فيما سبق. بدلاً من جذب القلم المسنن على اللوحات بلا انقطاع، بتحديد محيط الشكل التصويرى بسلسلة من الحزات، بمساعدة نوع جديد من الأقلام ذى مقطع ثلاثى. يتم إنتاج العلامات من خلال تكرار إشارة واحدة، ولكن باتجاهات متنوعة. تتقلص تدريجيًا اتجاهات الأسهم، إلى أن لا يبقى سوى أربع أو خمس محددة جيدًا، بذلك تفقد الإشارات صفتها التصويرية الأصلية لتتحول إلى إشارات مسمارية (على شكل مسمار) كما سموها علماء الأشوريات. مسمارية الإشارات غير العددية (شكل ٤) تمت بشكل أساسى حوالى ٢٦٠٠ ق. م، وصاحبها إعادة توجيه فى المكان لإشارات تميز المحاور الأفقية والرأسية.



شكل (٤)

مسمارية خمس إشارات غير عددية خلال المرحلة من ٣٢٠٠ إلى ٢٦٠٠ ق م.

ولكن الإشارات العددية لا تفلت كليًا من تلــك المــسمارية ومــن ضــمن التمرينات المدرسية التى كانت فى هذا الوقت فى مدينـــة شـــوروباك Shruppak بتاريخ ٢٦٠٠ ق.م، كان هناك مثالان يخصان تعلــيم الكتبــة يعالجــان المــسألة الرياضية نفسها. السؤال مطروح فى المنطقة العليا (على التــوالى الوجهــة) مــن اللوحة وإجابة الطالب فى المنطقة السفلى (على التوالى على العكس). إن الإشارات العددية المستخدمة فى الإجابة بديهيًا هى للنظام S (شكل ٥)



شكل (٥)

تمرين مدرسى TSŠ 671 و TSŠ50

وجدت فى فارا شوروباك القديمة (نحو – ٢٦٠٠)

[D'apres Jestin 1937 , pl.21 (1) 142 (2)]

مخزن غلال شعير (guru) رجل واحد يحمل ٧ سيلا sila

كم عدد الرجال (العمال) المطلوبين لإفراغ المخزن؟

. ١٦٤٥٧١ ويبقى ٣ سيلا الإجابة (١٦٤١٦٠)

وبالتالى نستطيع عمل ملاحظتين، الأولى: إن صوتية الإشارات غير العددية أعادت إمكانية كتابة أسماء الوحدات بوضوح، ونرى هنا ظهور السيلا، وهى مقياس السعة تساوى تقريبًا لتر، وتنقسم بذلك معلومة القياس والأوزان إلى مجموعتين من الإشارات، الأولى تباشر الكم الصافى، دائمًا فى نص نوعى لنظام القياس والأوزان الخاص، الأخرى (جزئيًا متكرر) مشيرًا لهذا النظام بوضوح. وهذا سوف يمكننا من تفكيك المجموعة الأولى من نصها القياسى الخاص، كما سنرى.

الثانية: هو الإبدال أو التعويض للإشارة بإشارة فى النص الثانى، لقد استبدلت الدائرة الخارجية فى الإشارة القديمة بأربعة خطوط متقاطعة (مسمارية)، محززة بقلم البوص المثلث، وهى التطبيق الجزئى على الإشارة العددية الكاملة للتسمير للإشارات غير العددية.

والظاهرة نفسها يمكن رؤيتها فى الجدول الأول للرياضيات الذى لدينا والذى يعود لعصر هذه التمرينات نفسه؛ حيث إن هذا التنظيم المرتب والنمطى لهذا الجدول يسهل استخدامه فى حلول المسائل الرياضية.[٥٩]

(٥٩)يمكن الرجوع لمثال ريتر عام ١٩٨٩ عن استخدام الجداول، وعمومًا لشكل النصوص الرياضية التى نطرحها لحضارة ما بين النهرين.

وهنا ترجمة للخانات الأولى:

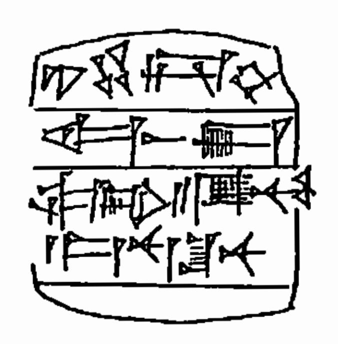
طول نيندان		
(مربع)	مربع	مربع
(كسر ...)		

إن الفرق بين نظام الترقيم المنتظم مثل الذى لدينا فى هذه الأيام، والمرحلة التى أحاول أن أصفها يمكن رؤيتها على الأخص على مستوى جدول الضرب هذا. لم يكن يوجد بالطبع فى بلاد فيما بين النهرين وفى هذا التاريخ جداول الضرب "بعدد" (مثلما يوجد عندنا الآن جدول الضرب فى "٣" أو فى "٧")، الحاصل الوحيد للكميات أو الخيرات الذى يعطى معنى فى سياق القياس والأوزان مثل الذى هو عندنا الآن هو حاصل ضرب طولين والذى يعطى مساحة، وهذه هى الجداول الوحيدة التى تحت أيدينا.

تلك الجداول تعرض تتابع تنازلى لطول وعرض الحقول المربعة (بوحدة النظام S) والمساحات المناظرة، مكتوبة مباشرة فى قياسات المساحات (بمعنى أنه بوحدات نظام G). فى خانات المساحة، نرى الإشارة المسمارية التى قابلناها من قبل فى التمرينات السابقة. بمعنى آخر، تمتد مسمارية الإشارات غير العددية، التى تشرح لأنها كانت صعبة فى الرسم إلى الإشارات العددية، ولم تسبب تلك العلامات أية صعوبات خاصة، إلا فى أهمية تغيير قلم البوص فى الرسم. وهذا التغير المادى والتخطيطى فى عقلنة حركة الكتابة له، نتائج مهمة فى المجال العددى.

مرحلة أكاد

كانت أول إمبراطورية فى بلاد ما بين النهرين تسمى أكاد (من ٢٣٥٠ إلى ٢٢٠٠ ق. م) وكانت تضم مجموعة مدن مختلفة تحت حكومة واحدة وتعمل على تطوير الإدارة التى يجب أن تواجه العمل الضخم، ومن ضمن هذه الإصلاحات المقامة نجد العديد منها يختص بعقلنة نظام الكتابة وأنظمة القياس والأوزان – هذه حالة متكررة – كما يشهد بذلك تبنى الثورة الفرنسية للنظام المترى. إن الإصلاحين الأساسيين لأكاد هما التسمير الكامل للإشارات العددية ودوران العلامات لـ ٩٠ درجة فى غالبية أنظمة القياس، ويمكن أن نبين هذين التطورين من خلال تمرين رياضى لهذه الفترة. وإليكم لوحة صغيرة تقدم المسألة والحل فيما يلى (شكل ٦):



ús-*hi*

sag̃ — $aša_5$

sag̃-bi kùš-numun

GIŠ.BAD zipaḫ

2 4 est la longueur (du champ).

(Quelle est) la largeur (telle que) 1 ⊢ est la surface ?

Sa largeur : 3 **kùš-numun** 1 GIŠ.BAD 1 **zipaḫ**

شكل (٦)

تمرين مدرسى ٢٩

٢ ٤ هو الطول (للحقل).

ما العرض حيث ١ هو المساحة؟

عرضه: ٣ kùš-numun ١ GIŠ.BAD ١ zipah

حساب أبعاد الحقل (نحو– ٢٣٠٠ ق م).

[Limet 1937: pl. 9]

مثلما نراه هنا، فإن دوران الإشارات تفاضلى تبعًا للنظام؛ فإشارات قياسات الطول مأخوذة من النظام S (سطر ١ و٣)، وتقاوم دوران الـ ٩٠ درجة وتظل رأسية ، بعكس الإشارات العددية للنظام G (سطر ٢). بالمقابل فإن المسمارية عمومًا، كل ذخيرة الإشارات العددية - مثل غير العددية - تكتب الآن بقلم واحد من البوص، وأصبح الحز خطًا رأسيًا، والدائرة علامة "بزاوية" القلم.

ولكن المكسب فى السرعة التى يستطيع بها الكاتب أن يكتب النص، نتج عنها تشوش بيانى متزايد بين الإشارات التى كانت فى الماضى متميزة تمامًا.

إن آثار الدوران ٩٠ درجة يتجه لنفس الاتجاه: أن يكون هناك ارتفاع محدد لكل الإشارات، مانعة بحيث تمنبع فروق المقاس التى كانت من علامات التمييز فى نظم القياس والأوزان. إن الحز الكبير لم تعد أكبر من الصغير، ونلاحظ أن ذاك التحديد يفرض أيضًا على الأنظمة التى لم يتم إعادة توجيهها.

لقد بذلت مجهودات لإبطال الغموض المفروض على المسمارية والدوران ونصلح بذلك التمايزات الأساسية؛ لتحديد مفهوم الإشارات العددية. ومثلاً هنا، الاختلاف القديم (للطول) بين الحزين لنظام S الذى يضع رتبتين من الآحاد المتميزة ولقد استبدلت بفرق فى السمك؛ الخط الرأسى ذى الحجم الثابت الذى يمثل وحده الآن الاثنين. ولنأخذ فى الاعتبار نصوص أخرى لعصر أكاد، ونأتى الآن للرسم المسمارى الآتى:

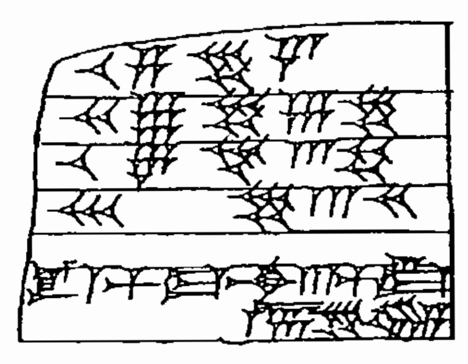
S

G

مرحلة أور ٣:

وفوق أنقاض إمبراطورية أكاد بنيت إمبراطورية جديدة تسمى أور ٣، ولقد عمل ازدياد التبادلات الإدارية المكتوبة على تزويد أيضًا احتيــاج فعاليــة تقنيــات التسجيل. هذا العذو السريع للكتابة وصل فى نهاية الألفيــة الثالثــة وفــى بعــض النصوص، إلى ترك التميز بين نوعين من الخطوط الرأسية فى نظــام S؛ حيــث ترك الخط الرأسى السميك وهو من الآثار الأخيرة للكتابة غير العياريــة لــصالح الخط البسيط.

ولكن أخذ الكتبة فى بلاد ما بين النهرين يحولون هذا اللغز لصالح الحساب، والتى تبدو لنا مبهرة بأثر رجعى. لقد عرفنا ما حدث فى هذا العصر بفضل وثيقة؛ وهى واحدة من بين عشرات الآلاف من النصوص التى نشرت لهذا العصر حتــى الآن، وهو يبدو نصًا لا قيمة له لحسابات تسليم المعادن (شكل ٧).



مجموع ½ mana و 3 ½ gín
ناقص ٧ سى še من النقود

شكل (٧)

حساب للمعادن يوس Yos ٤٢٩٣ (حوالى - ٢١٠٠ قبل الميلاد)

الأسطر الخمسة الأولى

D'apres Keiser 1919: pl. 78]

وها هى الخمسة أسطر الأولى من الوثيقة:

إن الأربعة أسطر الأولى تمثل فى الواقع عملية جمع قام بها الكاتب وتركها على اللوحة لأسباب غير معروفة، وتظهر نتيجتها فى السطر الخامس (بوحدات الوزن العادية). ونرى التتابع المتبادل للإشارات يمت لمسمارية الحزوز الصغيرة القديمة والدوائر الصغيرة القديمة لنظام S (لأنها رأسية). لا يتعلق الأمر بكتابة عدد كالذى رأيناه حتى الآن. فى الواقع، إنه فى إطار الكتابة المسمارية، الدائرة الكبيرة، التى رأيناها، استبدلت بإشارة مسمارية مختلفة تمامًا عن تلك التى حلت محل الدائرة الصغيرة. وهنا على العكس نجد إلى اليسار إشارات الحزوز، ونرى دائمًا الإشارات نفسها (الدوائر الصغيرة السابقة). نحن الآن فى وجود نظام كتابة الذى يحدد قيمة الإشارة فيه "وضعها" و(ليس شكلها التخطيطى)، وهو بذلك نظام عددى الوضع. ولدينا أيضًا للحظ! فى أول إثبات لنظام الاتجاه وجود الصفر ك "مكان فارغ"، الفراغ المتروك فى نهاية أول سطر. وبعكس النظام الذى لدينا، بدلاً من القاعدة العشرية، نظام الموضع ذى قاعدة ستينية، وهو مناظر للنسبة بين الحز الكبير للحز الصغير فى نظام S. وإذا كتبنا الأربعة أسطر الأولى بالطريقة الحديثة، يكون لدينا:

$$^{٠}٦٠\times٠ + ^{١}٦٠\times٥٤ + ^{٢}٦٠\times١٤$$

$$^{٠}٦٠\times٥٠ + ^{١}٦٠\times٥٦ + ^{٢}٦٠\times٢٩$$

$$^{٠}٦٠\times٤٠ + ^{١}٦٠\times٤٣ + ^{٢}٦٠\times١٧$$

$$^{٠}٦٠\times٢٠ + ^{١}٦٠\times٥٣ + ^{٢}٦٠\times٣٠$$

$$^{٠}٦٠\times٥٠ + ^{١}٦٠\times٢٧ + ^{٢}٦٠\times٣٣ + ^{٣}٦٠\times١ = ^{٠}٦٠\times١١٠ + ^{١}٦٠\times٢٠٦ + ^{٢}٦٠\times٩٠$$

إذا علمنا أنه يوجد ١٨٠ **še** فى واحد **gĭn** و٦٠ **gĭn** فى واحد **mana**، وهذا الرقم يتحول إلى:

Še(٦٠/٥٠ ٢٧ × ٣) + **gĭn** ٣٣ + mana ١

Še(½ ٨٢ + (**gĭn** ٣+مانا ½) + mana ١=

še ½ + še (٧− ٩٠)+ gĭn٣+ mana ١ ½ =
(še(١/٢+)š e٧ − gĭn٣ ½ + mana ١ ½ =

بمعنى أن الكمية المشروحة فى السطر ٥ عند نصف – še تقريبًا (أو ٥٠ مج على أكثر من ١,٥ كج).

وأيضًا الأكثر أهمية أن خلق نظام الموضع هو فى الحقيقة وللمرة الأولى يستقل عن نظام القياس والأوزان، وعن كل الأرقام فى النظام نفسه – إلا فى آخر سطر عندما يكون المطلوب هو إيجاد حل نهائى ملموس، والذى يجب أن يكون وزنًا (يكتب إذن فى نظام القياس المناسب). إنها خطوة كبيرة للأمام فى عملية طويلة لتجريد العدد، وهى عملية مستمرة حتى يومنا هذا. وبعكس الذى لاحظناه فى الجداول الأولى المذكورة بأعلى، أصبح من الممكن (العمل) على تلك الأرقام دون قيود بالنسبة لأى نظام قياس. فى الألفيتين الباقيتين فى حضارة مابين النهرين القديمة، سوف نجمع هذه الأعداد ونضربهم ونأخذ جذر تربيعهم ومعكوساتهم تبعًا لتطورات حل المسائل الرياضية، دون الأخذ فى الاعتبار أبدا الحسابات أصلهم القياسى الملموس فى المسالة محل البحث.

ختام

بالإضافة إلى فائدتها لفهم تركيب واحدة من مفاهيمنا الحديثة، فإن إعادة البناء المفصلة والملموسة تصور جوانب مهمة للعلاقات بين الكتابة والأعداد والتى ذكرتها فى المقدمة.

رأينا بذلك كيف أن محو تمييز الإشارات الممثلة للكمية فى أنظمة القياس المختلفة، أى توحيد الكتابة، تعيد بناء تنظيم أجزاء النصوص الرياضية.

ورأينا أيضًا بعض تأثيرات الجذب بين التطورات الخطية للكتابة واللبس الذى يحدث. بدايةً لم تكن الكتابة فى بلاد ما بين النهرين خطية، فكان ترتيب

الأعداد عشوائيًا داخل الخانة. تحتاج تحويلات الكتابة إلى تعويضات في حالة الرياضيات، كذلك تحلل عناصر مختلفة داخل الكتابة، المعلومة الكمية، واسم الوحدة المرتبطة بها يولد إمكانية عزل هذه المعلومة الكمية حيث نجرى عليها هى وحدها تحويلات متنوعة.

التأثير الديناميكى الذى يولد من عدة تعديلات يصل فى النهاية إلى مادة رياضية حديثة، والعدد الستينى الذى أدخل فى الحسابات، فى إطار نظام وحيد للترقيم الموضعى. لم يأتِ هذا الميلاد كانعكاس بسيط ذاتى لإصلاحات الخط، ولكن طبيعة دعامة الكتابة (ما يكتب عليه)، والاحتياجات البيروقراطية المتزايدة لدول ما بين النهرين أدت بشكل حاسم لمحاكاة هذا التغير وتغيير اتجاهه.

هذه العلاقة اللصيقة بين الكتابة والرياضيات، والتى أشرت إليها فى البداية، أتت بعد الفترة التى درستها هنا بالتفصيل. إنها بعيدة عن أن تستنفذ فى نهاية ألفيتنا الثانية. توفر كتابة الأعداد فى برامج الحاسب، خاصة فى المسائل المرتبطة بضرورة نهائية هذه الكتابة بالنسبة لنوعيات الأعداد المكتوبة العادية، تجلب مثلاً حديثًا للخصوبة الحالية لهذه العلاقات. أعتقد أن هذه العلاقات أهم فى ملاحظتها، بحيث إن الكتابة المدركة تلقائيًا الآن كانعكاس بسيط للغة المنطوقة - والدليل أن الإنترنت بقى لمدة كبيرة غير قادر على استيعاب القوانين الرياضية سوى كصور.

كنت أود أن أنهى بسؤال مفتوح. إنها قضية اختفاء دعامة الكتابة (الشىء المكتوب عليه)، واختفاء الكتابة نفسها (المدركة كتسجيل بسيط) لحساب المعلومة المبنية على صورة. مع الأخذ فى الاعتبار العلاقات العميقة بين الرياضيات والكتابة، يبدو لى من المهم أن نسأل أنفسنا إذا كانت الكتابة والنشاط الرياضى قد وجدوا أنفسهم وتحولوا وكيف تم ذلك؟

المراجع:

- BENOÎT (P.), CHEMLA (K.) et RITTER (J.) (éd.), *Histoire de fractions, fractions d'histoire*, Bâle, Birkhäuser, 1992.
- GREEN (M.), « Animal Husbandry at Uruk in the Archaic Period », *Journal of Near Eastern Studies* 39, 1980, p. 1-35.
- JESTIN (R.), *Tablettes sumériennes de Suruppak conservées au Musée de Stamboul*, Paris, de Boccard, 1937.
- KEISER (C.), *Selected Temple Documents of the Ur Dynasty*, New Haven, Yale University Press, 1919.

- LIMET (H.), *Études des documents de la période d'Aggadé appartenant à l'Université de Liège*, Paris, Les Belles Lettres, 1973.
- NISSEN (H.), DAMEROW (P.) et ENGLUND (R.), *Archaic Bookkeeping. Writing and Techniques of Economic Administration in the Ancient Near East*, Chicago, University of Chicago Press, 1994.
- POMMARET (J.-F.), *Systems of Partial Differential Equations and Lie Pseudogroups*, New York, Gordon and Breach, 1978.
- RITTER (J.), « Babylone-1800 » *in* Michel Serres (éd.), *Éléments d'Histoire des Sciences*, Paris, Bordas, 1989, p. 17-37.

الاضطراب الدوامي[٦٠]

بقلم: يوريل فريش

Uriel FRISCH

ترجمة: مها قابيل

إن محاضرتى تقع فى إطار موضوع آفاق الرياضيات الحديثة، ومن المفهوم أنى سأحدثكم عن جوانب الاضطراب turbulence التى تظهر فى الرياضيات، ويكون الموضوع فى كل مرة بين حقول الدراسة، ويمس كما سترون حضراتكم الفيزياء والميكانيكا وميكانيكا السوائل والأرصاد الجوية والفلك الفيزيائى، وبعد مقدمة بسيطة سأقول لكم كلمتين عن صياغة المسألة ثم سأحدثكم عن الانتقال من الفوضى وتأثير الفراشة والحركة البراونية، وعن القنبيط، وفى النهاية سأحدثكم عن المليون دولار التى وعدنا بها الأستاذ كلاى M.Clay.

أولاً: إن كلمة اضطراب كانت تعنى فى البداية حركة غير منظمة لجماعة من الناس (تعنى turba باللاتينى، جماعة من الناس) وفى القرون الوسطى كانت تستخدم كلمة "turbulence" مرادفة لـ troubles بمعنى مشكلات. هكذا وجدت على مخطوط فرنسى موجود بمتحف ج. بول جيتى J. Paul Getty بلوس أنجلوس وجدت مؤخرًا كلمة "Seigneur delivrez nous des turbulences" يا الله أغثنا من التوتر turbulence. كما ترون فإن المعنى قد تغير.

أولاً: الاضطراب يعد جزءًا من التجربة اليومية: لسنا فى حاجة إلى ميكروسكوب أو تلسكوب لملاحظة النفثات الملتفة لدخان السيجارة، أو الزخارف السخية للقشدة المصبوبة على القهوة، أو تشابك الدوامات فى سيل الجبل كما نرى فى الشكل (١). إن ما نراه مركبًا جدًا، وفوضى شديدة، ولكنه بعيد عن أن يكون

---

(٦٠)نص المحاضرة رقم ١٧٧ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٥ يونيو ٢٠٠٠.

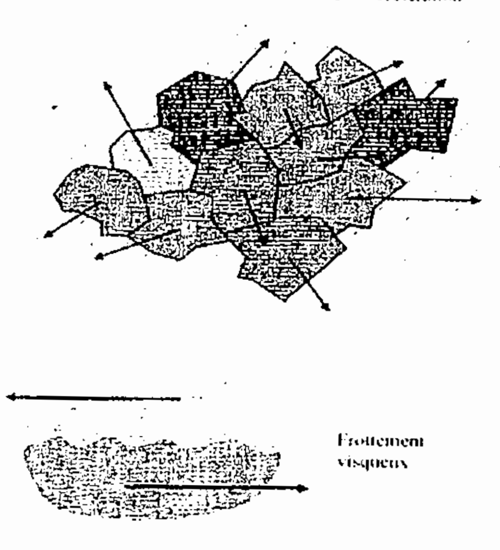
فوضى كاملة، وعندما ننظر إلى سريان الاضطراب حتى لو كان لحظى فى صورة، فإن ما نراه مختلفًا ومذهلاً أكثر من الفوضى الكلية التى نحصل عليها بإلقاء حفنة من الرمل الجاف على صفحة ورقية، والاضطراب عندما نلاحظه ملئ بالبناءات وخاصة الدوامات ككيانات معروفة منذ العصور القديمة، وتم دراستها ورسمها على يد ليونارد دو فينشى (الذى كان بلا شك الأول فى استخدام كلمة اضطراب turbolenza باللغة الإيطالية؛ لوصف الحركات المركبة فى الماء أو الهواء). وأعتقد أن هذا الخليط الحميم من النظام والفوضى الذى يفعل فى الوقت نفسه سحر، وواحدة من الصعوبات الرئيسية.

من السهل جدًا الحصول على الاضطراب فى الحقيقة كل مرة يسرى فيها سائل حول عقبة مثل: سريان الماء فى أثر مركب إن كانت سرعته كافية سوف نحصل على اضطراب. إننا نجد قليلاً منه فى كل مكان: فى الدورة الدموية داخل الأوعية الدموية، فى سريان الهواء حول سيارة أو طائرة، مسئول عن الاضطرابات الشهيرة التى من أجلها يطلبون منا ربط الأحزمة، أو أيضًا التحركات المناخية، وتحركات الغاز الذى يكون النجوم مثل شمسنا، وفى النهاية تقلبات الكثافة فى الكون الأولى يُعطى الميلاد فى زمن لاحق للبناءات الكونية الكبيرة الحالية، مثل ركام المجرات (شكل ٢). لولا هذا الاضطراب لكان تلوث المدن سيقاوم لعدة آلاف من السنين، ولما كانت الحرارة الناتجة من التفاعلات النووية فى النجوم تتمكن من الهرب بمقياس زمن مقبول، ولأصبحت الظواهر المناخية يمكن التنبؤ بها قبل حدوثها بوقت طويل.

شكل (١)

إن المعادلات التى تحكم حركات السوائل أيًا كانت مضطربة أم لا، تم كتابتها لأول مرة على يد كلود نافير فى عام ١٨٢٣، وتسمى دائمًا معادلات نافير- ستوك، وفى الواقع بسبب التحسينات التى أسهم بها جورج ستوك لاحقًا، وإنها فى الحقيقة معادلات نيوتن تلك التى تربط القوة بالعجلة، معادلات يجب تطبيقها فى كل جزئية من السائل وهو ما حدث لأول مرة على يد ليونارد يولر، منذ ثلاثة قرون. والإسهام الحساس لنافير هو إضافة - للمعادلات - حد الاحتكاك ما بين مختلف طبقات السائل بالتناسب مع معاملات اللزوجة وتغيرات السرعة فى (شكل ٣). إن هذه المعادلات التى نستطيع أن نحلها بالحاسب الآلى تحمل تحديات كبيرة أريد أن أعود إليها مرة أخرى.

لقد أصبح الاضطراب علم تجريبى فى أواخر القرن التاسع عشر عندما تمكن الإنجليزى أُوسبرن رينولدز Osborne Reynolds من الانتقال من النظام الرقائقى إلى نظام الاضطراب. تعلمون أنه فى داخل الأنبوب، إذا كان الماء يمر ببطء سنحصل على شبكات منتظمة؛ أى سريان رقائقى. إذا كان يمر بسرعة سيظهر عدد كبير من الدوامات وفقد الشحنة فى الأنبوب سيكون متفاوتًا جدًا. لقد استطاع رينولدز أن يوضح القوانين البسيطة بالنسبة لأى أنبوب للانتقال إلى الاضطراب وأدخل عددًا يسمى اليوم عدد رينولدز، وهو حاصل ضرب نصف قطر الأنبوب D والسرعة المتوسطة للسريان داخل الأنبوب V الكل مقسوم على لزوجة السائل v (لزوجة الهواء حوالى $0.1\ cm^2/s$ لزوجة الماء $0.01\ cm^2/s$) ولنكن $Re= DV/v$

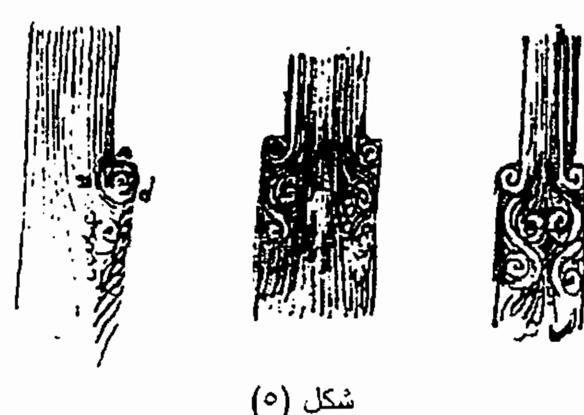


شكل (٣)

لقد بين رينولدز عندما يتعدى هذا الرقم قيمة ما حرجة، حوالى عـدة آلاف، يصبح سرياناً مضطربًا فجأة. نلاحظ تحولات مناظرة ولكن مدهشة فـى الـسريان المفتوح وراء إسطوانة (شـكل ٤). ورأى دافنـشى Leonard de Vinci ظـاهرة الالتفاف الزقاقى ومثلها بطريقة صحيحة تقريبًا (شكل ٥).



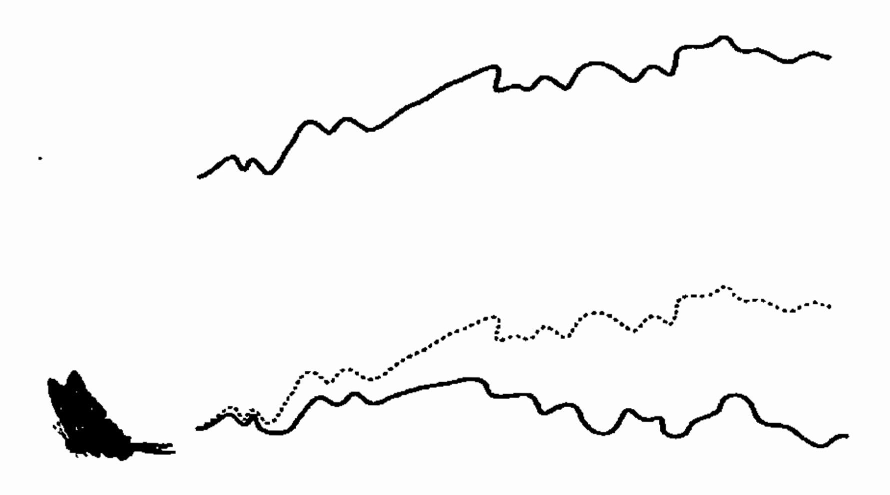
شكل (٤) الزقاق اللفائفى لـ Von Kármán



شكل (٥)
تدفق عند المنحدر فى حالة اتساع مفاجئ

خاصية مهمة جدًا لهذه السريانات المضطربة، والتى تظهر منذ التحول، وهى خاصية الفوضى chaos، وبشكل أكثر دقة، تبدو السريانات المضطربة لا يمكن التنبؤ بها. ماذا نعنى بـ "لا يمكن التنبؤ بها"؟ لنفترض أننا نعرف بشكل مفصل شكل السريان فى لحظة ما، على الرغم من أن هذا السريان يتم إدارته بمعادلات محددة، أو محددة كما يقال عمليًا لا يمكن توقع التغير التالى لأزمنة طويلة، ونظرية الفوضى تلك التى يرجع الفضل فيها لهنرى بوانكاريه Henri Poincaré ودافيد ريويل David Ruelle، إدوارد لورنتز Edward Lorenz، ومدرسة كولموجروف Kolmogorov الروسية، وتلامذته فلاديمير أرنولد Vladimir Arnold وياكوف سيناى Yacov Sinai، والمداخلات المهمة جدًّا للأرصاد الجوية. فلنتخيل أننا كى نتنبأ بالمناخ فى لحظة ما، نقيس الهواء والضغط ودرجة الحرارة على كل نقطة من الكوكب ونحاول أن نتنبأ بالتغير التالى للمناخ بحسابات على الحاسب، فى الحقيقة بعد وقت قصير نسبيًا لن نستطيع أن نتوقع بشكل مفصل ما سيكون عليه المناخ وهذا أيًا كانت قوة الحواسب، ونقول إن الاضطراب الجوى لا يمكن التنبؤ به، حيث إنه يصبح حساسًا لأقل عطسة، أو ضربة جناح فراشة، كما اقترح رجل الأرصاد الأمريكى إ. لورنتز E.Lorenz.

تأثير الفراشة الذى يعود للورنز موضح فى (الشكل ٦) حيث تمثل المنحنيات ليس مسار الفراشة ولكن – بشكل رمزى – نقطة ممثلة للنظام المدروس ككل. المنحنى بأعلى مرتبط بالحالة التى بلا فراشة، والحالة بأسفل بضربة جناح الفراشة، يبقى المساران قريبان فى البداية ثم (لإظهار ذلك رسمت المسار الأول منقط) ثم يبتعدان عن بعضهما سريعًا. عمليًا غير ممكن التنبؤ بتفاصيل المناخ الذى سيكون بعد عشرة أيام، هناك تطورات حديثة يرجع الفضل فيها لأعمال مايكل جيل Michael Ghil وبرنار لوجراه Bernard Legras، وروبرت فوتارد Robert Vautard، تجعل من الممكن التنبؤ بشكل غير دقيق بقياس عدة أسابيع، أو أيضًا عدة أشهر فى المناطق الاستوائية.



شكل (٦)
تأثير الفراشة

فى الجيوفيزياء وفيزياء الفلك، تعتبر أعداد رينولدز الكبيرة جدًا والتى تصل إلى عدة ملايين وأكثر عملة رائجة، فنقطة مهمة جدًا هو عندما نزيد من عدد رينولدز والذى يمكن أن نحققه بتخفيض اللزوجة، ظهور المزيد من الدوامات ذات

الأحجام الصغيرة، كما نرى (فى الشكل ٧)، وهى تمثل دفعة نفثية اضطرابية. كل دوامة هى تقريبًا مثل الجزئ. والتى نسميها درجات من الحرية، عندما يكون عدد رينولدز كبير معنى ذلك أنه يوجد الكثير من درجات الحرية، وهو ما نسميه نظـــام الاضطراب المتطور.



شكل (٧)

من السهل ملاحظة هذا النظام فى أفران خاصة كبيرة الحجـــم مثــل التـــى نختبر فيها تصميم السيارات والطائرات، ونستطيع الآن أن نصنع أفرانًا خاصــــة، تستغل المميزات الخاصة جدًا للهيليوم فى درجات الحرارة المنخفضة كما أظهرت

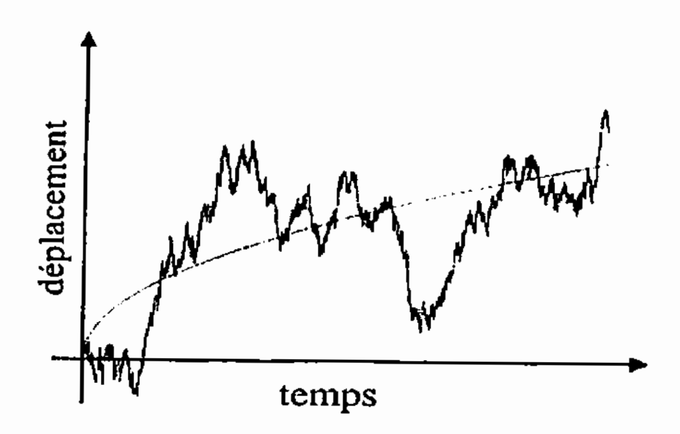
أعمال بيرنار كاستين Bernard Castaing، في جرنوبل وباتريك تبليــنج Patrick Tabeling في باريس، وإذا اختبرنا هذا السلوك بدلالة الزمن والسرعة في نقطـــة من السريان مقاسة بالمجسات سنصطدم بكونها مناظرة لمنحنى الحركة البراونيـــة (شكل ٨) الأخيرة يمكن أن نتخيلها كاستشهاد لوضع السكير – الذى يمسح الشارع الكبير للقرية عند الحانات العديدة – كدالة في الزمن، السكير الذى يتسكع كل مـــرة في اتجاه مختلف دون أن يذكر أبدًا الاتجاه السابق في مسيرته نحو المجهول، ومن السهل أن نرى أن التحرك النمطى لمثل هذا السكير في فترة زمنية معينة يتناســـب ليس مع الزمن الذى يمر ولكن مع الجذر التربيعى (القانون نفـسه الــذى يحكـــم الأخطاء في استطلاعات الرأى)، ونجد في سريان الاضطراب المتطور أن تغيـــر السرعة أثناء فترة زمنية معينة يتناسب ليس مع الجذر التربيعى ولكن مع الجـــذر التكعيبى، وقانون الجذر التكعيبى الذى نحصل عليه بحجة بعديـــة مـــرتبط بحفـــظ الطاقة تم التنبؤ به سنة ١٩٤١ على يد الرياضى الروسى كولموجوروف Andrei Kolmogorov تم إثباته على نطاق واسع بتجارب ومحاكاة على الحاســـب، وفـــى عام ١٩٢٢ استشعر لويس ريتشاردسون Lewis Frey Richardson ما كان يحدث بتقديم رؤيته عن شلال الطاقة من القياسات الكبيرة في اتجاه الـــصغيرة، لـــسريان الاضطراب، الرؤية التى تأثرت بشعر للشاعر الإنجليزى جوناثان سويفت:

"so, nat'ralists observe, a flea
Hath smaller feas that on him prey;
And these have smaller yet to bite 'em,
And so proceed ad infinitum".

بدلاً من أن أغامر بترجمة هذا الشعر أطلب منكم أن تتخيلوا أن هناك بقـــة كبيرة تمص دم الكلب الخاص بكم، يمثل دم الكلب الدور الذى تلعبه الطاقة الحركية في الاضطراب الآن تخيلوا أن البقة الكبيرة بدورها تهاجمها بقات أصـــغر منهـــا تمص دمها وهكذا إلى أن نصل إلى بقات صغيرة جدًا يتكون منها الدم في سياقات جزيئية، وإن الوحش الذى يخرج من خيال سويفت يكون مـــا يـــسميه مانـــدلبروه كسورى، تتميز هذه الكسوريات ببعد واحد ليس عددًا صـــحيحًا. إن الأشـــياء ذات

البعد الصحيح ٣،٢،١،٠ هى مثلاً نقط، خطوط، أسطح، وأحجام؛ كى نتخيل شيئًا أو مادة ذات بُعد كسورى بين ٢ و٣ ولنفكر مثلاً فى قنبيطة، البُعد الكسورى للاضطراب وبدقة أكثر الذى يسميه الرياضيون بعد هاوسدورف Hausdorff لتشتت الطاقة قريب جدًا من ٣. إذا كان ٣ فعلاً فإن النظرية التى اقترحها كولموجروف عام ١٩٤١ تكون صحيحة تمامًا مما يفسر النجاح الذى لاقته هذه النظرية فى التمهيد للنماذج التجريبية فى حسابات المهندسين.

يبقى حساب مثل هذه الأبعاد بدءًا من المعادلات الأساسية لميكانيكا السوائل مشكلة مفتوحة؛ حيث يبد أن هناك تقدمًا مهمًا حدث فى الأعوام الأخيرة باستخدام الأدوات الرياضية المأخوذة من نظرية الكم للمجالات، المطبقة على نموذج مبسط يرجع للأمريكى روبرت كريشنان Robert Kraichnan. نفترض فى هذا النموذج سريان الاضطراب المعروف ونبحث عن توصيف للخواص لراسم منقول عن هذا الاضطراب، كما هو موضح فى (شكل ٩) لأنطونيو سيلانيى Antonio Celani وآلن نوليه Alain Noullez، وماسيمو فرجاسولا Massimo Vergassola، تمثيل لحظى لتركيز الراسم الذى نحصل عليه بمحاكاة الحاسب، ونستطيع تخيل أن المقصود هنا هو الملوث الذى انطلق فى المحيط، ويمكننا الآن حساب الخواص الكسورية لمثل هذه الملوثات لكن يلزمنا بلا شك سنوات قبل أن نستطيع إنجاح مشروع مماثل للخواص الكسورية للاضطراب نفسه.



شكل (٨)

الحركة البراونية

تركيز ثابت سلبى (ملوث) نقله سريان مضطرب ثنائى البعد من النـــوع الذى نجده فى المناخ والمحيط، وتمت محاكاتـــه عـــدديًا علـــى شـــبكة ٢٠٤٨×٢٠٤٨، والثابت شديد التقطع وله خواص "شاذة" فى المقيـــاس لا يمكن توقعها فى التحليل ثنائى البُعد، والتركيـــزات الـــضعيفة موضـــحة بالأزرق والأقوى موضحة بالأصفر. شكل لسيلانى (A.) Celani ونوليه (A.) Noullez وفرجاسولا (M.) Vergassola مرصـــد كـــوت دازيـــر Observatoire de la Côte d'Azur معمل ج. د. كاسينى Laboratoire de G.D. Cassini, UMR 6529; simulations a l'IDRIS, CNRS.

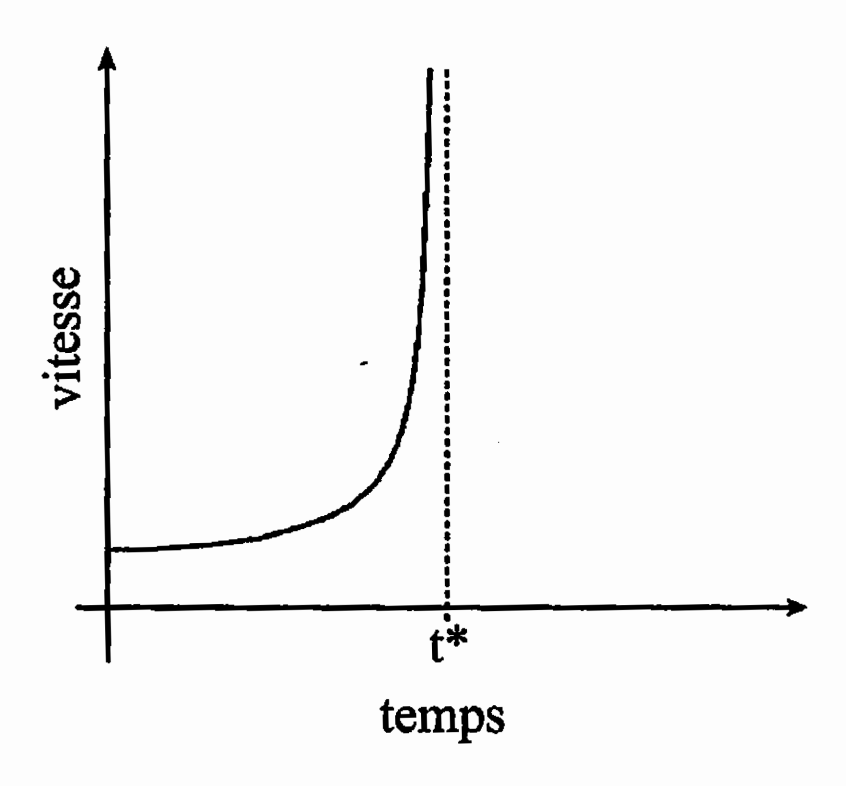
فى سريان الاضطراب، إذا كان التغير الوقتى للسرعة عند نقطة هو معطى عمومًا بشكل جيد بقانون الجذر التكعيبى لكولموجروف، نعرف منذ زمن أن ذلـــك ليس دائمًا صحيحًا. فمنذ عام ١٨٤٣ لاحظ أدهيمار بـــار Adhemar Barre مـــن Saint Venant أن "السريانات فى القنوات ذات المقاطع الكبيرة التى نقول عليهـــا اليوم إنها لها أعداد رينولدز كبيرة، تمثل انقطاعات ودوامـــات وحركـــات أخـــرى

معقدة، والنقطة المهمة هى الانقطاعات، ونعرف عن طريق التجربة أن سرعة السريان تتغير بشكل كبير ما بين نقطتين متجاورتين، وإذا حدث بالصدفة أن مقياس هذا التغير أصبح من الممكن مقارنته بالمسافة التى تقطعها جزيئات السائل ما بين اصطدامين متتاليين، إذن يجب التفكير مرة أخرى فى الأساسات الرياضية لمعادلات نافير - ستوك. فالطريقة التقليدية للحصول على المعادلات تفترض فصلاً قويًا مابين العالم المجهرى للجزيئات والعالم المسمى الماكروسكوبى؛ حيث يعامل السائل كوسط مستمر.

يوصلنى ذلك لتحدى رياضى كبير والذى يعتبر مادة لسبع جوائز قيمتها مليون دولار التى أعلنت عنها مؤخرًا مؤسسة كلاى فى College De France، والمشكلة هى إثبات أن معادلات نافير ستوك Navier –Stock تقودنا إلى مسألة "جيدة الطرح"، ومعنى ذلك أنه إذا كنا نعرف حركة السائل فى لحظة ابتدائية يكون للمسألة حل وحيد فى كل اللحظات التالية، ولاحظوا أن هذه المرة المشكلة ليست مشكلة أخطاء ولكن فردية الحل. لقد تم حل هذه المشكلة عام ١٩٣٠ على يد جون ليريه Jean Leray فى حالة بعدين فى الفراغ وهذا الحل ملائم فى حالة الأرصاد الجوية وعلوم المحيطات، والمشكلة أكثر صعوبة فى البُعد الثالث، وسأحاول أن أعطى الآن مفهومًا للصعوبة دون استخدام الشكلية الرياضية، أولاً يجب أن نلاحظ أن السائل الذى ليس فى حركة منتظمة تحتك شبكات السوائل فيه بعضها ببعض بسبب اللزوجة، مما يعمل على إبطاء الحركة النسبية، فى السرعات الصغيرة وبالتالى أعداد رينولدز الصغيرة (فهى تتناسب مع السرعة) تأثيرات الاحتكاك للزوجة مهمة جدًا لكل الدوامات الموجودة فى السريان، وهذا السريان يصقل كل شىء وليس من الصعب إثبات أن المسألة "جيدة الطرح"، وفى المقابل تأثيرات الاحتكاك اللزوجى فى حالة عدد رينولدز الكبير تكون محدودة فى الدوامات الصغيرة والمشكلة تكون قريبة من مشكلة سائل كامل ذى لزوجة صغيرة ويتم تجاهلها، ونستطيع أن نثبت أن هذه المسألة الأخيرة "جيدة الطرح" فى زمن قصير ولكن ليس أكثر من ذلك، عمومًا فإن أفضل شيئًا نستطيع إثباته الآن أن السائل

الكامل لا يسلك أفضل من المتحرك الذى عجلته متناسبة مع مربع السرعة، وإن الفرضية التى تؤدى إلى زيادة كارثية فى السرعة، التى يمكن أن تصبح لا نهائية فى زمن قصير إلى حد ما (شكل ١٠) بعض المحاكاة العددية تقترح أن السائل الكامل هو فى الحقيقة أهدأ - لا يتباعد - ويوصلنا بذلك إلى مسألة "جيدة الطرح"، لأوقات طويلة اختياريًا، ومن الممكن أيضًا أن تتباعد حلول هذا السائل الكامل ولكن تأثير الاحتكاك اللزوجى يمنع هذا التباعد، وإنه بالتحديد ما يحدث فى نظرية كولموجروف عام ١٩٤١ ولكن ليس بالضرورة فى الحقيقة.

أحب أن أختم بأن أؤكد أن الاضطراب له مكانة خاصة جدًا فى الفيزياء المعاصرة. بإنها دائمًا تعتبر واحدة من المشكلات الكبيرى المفتوحة للفيزياء ولكن بعكس مشكلات أخرى حدودية للفيزياء، والظواهر التى تهتم بها فى الاضطراب لا تقع فى متناهى الصغر ولا عمومًا فى متناهى الكبر، وهى الظواهر موصوفة تمامًا بميكانيكا نيوتن دون أن يكون من المهم إدخال ميكانيكا الكم أو ميكانيكا النسبية؛ أى الأفكار الحديثة للفيزياء فى الفراغ، والزمن والمادة. كما ترون فإن الفيزياء التى تسمى تقليدية والتى درسناها فى المدرسة مازالت تحمل بعض الغموض الكبير.



الشكل (١٠)

تتناسب العجلة مع مربع السرعة: وتنفجر السرعة بعد فترة زمنية منتهية.

الاحتمالات والحركة البراونية[٦١]

بقلم: فيليب بيان

Philippe BIANE

ترجمة: مها قابيل

قوانين الصدفة

قد يبدو من التناقض أن نتكلم عن قوانين الصدفة؛ لأن هذه الكلمة تذكرنا بالذى لا يمكن تنبؤه، والذى ليست لدينا أية سيطرة عليه، ومع ذلك تخضع الصدفة لقوانين دقيقة جدًا. إن معرفة هذه القوانين يسمح لنا بعمل تنبؤات فى مواقف لا نتحكم فيها فى كل المعطيات؛ لأنها عديدة جدًا ولا تكون معروفة ككل، فالمثال الأكثر ظهورًا والذى أصبح شبه يوميًا فى مجتمعات الديمقراطية الحديثة، هو استطلاعات الرأى بنية الاقتراع والذى يسمح بالتنبؤ بنتيجة الانتخابات دون الحاجة لسؤال كل الناخبين ففهم طبيعة قوانين الصدفة لا غنى عنه إذا كنا نريد أن نعرف مدى وحدود هذه الطرائق. أولاً يجب معرفة أن طبيعة هذه القوانين هى مقاربة asymptotique: أى لا نستطيع استنتاج معلومات احتمالية عن تحقق حدث خاص، بل إن سلسلة الأحداث لها معنى إحصائى نثق فيه كلما كان العدد كبير، وكذلك عندما نلقى قطعة عملة فى الهواء فإن تماثل العملة يجعل هناك فرص متساوية لوقوع العملة جهة الملك أو الكتابة ولكن يُكسر هذا التماثل عندما تسقط، وواحدة فقط من هذين البديلين هى التى تتحقق. إن تساوى الاحتمال لا يلاحظ إلا إذا كررنا التجربة عددًا كبيرًا من المرات: من المعروف أن ترددات الظهور "للكتابة" أو "للملك" تتقارب من 1/2، وهذه الملاحظة تعمم لتعطى نتيجة أساسية لحساب الاحتمالات، الذى هو قانون الأعداد الكبيرة. وهو يعبر فى نسخته الأكثر بساطة

---

(٦١)نص المحاضرة رقم ١٧٨ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٦ يونيو ٢٠٠٠.

عن حقيقة أن تكرار الشيء عدد كبير من المرات للتجربة العشوائية نفسها والتي نتيجتها هي قيمة عددية، إذن متوسط النتائج الذى نحصل عليه يميل إلى أن يقترب من أمل رياضي للتجربة. هذا الأمل هو مجموع التوازنات لكل النتائج الممكنة كل منها متأثر بوزن متساوى لاحتمال الظهور إذا استعدنا مثال لعبة الملك والكتابة وإذا قررنا أن نعد 1 لكل ملك وصفر لكل كتابة نحصل عليهما عند رمى القطع، فإن قانون الأعداد الكبيرة يضمن لنا أن متوسط النتائج التى نحصل عليها والذى هنا يساوى تردد الظهور "للملك"، يقترب من 1/2عندما يصبح رقم السحب كبيرًا تبعًا للتجربة.

إن قانون الأعداد الكبيرة الذى يؤكد الطرائق المعيارية المستخدمة في الإحصاء،هو أيضًا الذى يسمح بمعرفة على المدى الطويل إن كانت صالة قمار تكسب دائمًا، أو أيضًا لتقدير مكاسبها المستقبلية. فى النهاية فإننا نسمى بشكل عام، ولكن بأقل دقة، "قانون الأعداد الكبيرة" كل نتيجة تتنبأ بسلوك محدد على المستوى العيانى (الذى يرى بالعين المجردة)، لنظام مكون من عدد كبير من العناصر المجهرية، والتى يتم التفاعل بينها بطريقة مركبة، ولا نستطيع توصيفها بالتفصيل. كذلك الكميات المركزة فى الديناميكا الحرارية التقليدية (الضغط، والحرارة... إلخ) هى متوسطات على مناطق صغيرة فى فراغ الكميات، التى تتنوع بشدة على المسافات الصغيرة. إن السلوك الذى يمكن التنبؤ به تمامًا، بمقياسنا لهذه المتوسطات، والذى يمكن ترجمته بقوانين معروفة لفيزياء الغازات هو تأثير أكثر عمومية لهذا القانون للأعداد الكبيرة. ليس له إلا قيمة تقاربية asymptotique، إننا نلاحظ إذن عندما نبقى مع الأعداد الكبيرة المنتهية انحرافات بالنسبة للسلوك المتوسط المتوقع، هذه الانحرافات هى أيضًا تتبع قوانين دقيقة ولكن هذه المرة ليست القيم التى نستطيع التنبؤ بها، فقط توزيعها الإحصائى، وكذلك نظرية النهاية المركزية تتنبأ بأن الانحراف عن النهاية فى قانون الأعداد الكبيرة يتبع قانون جاوس (الموصوف "بمنحنى بالجرس" الشهير) حيث التباين الذى يقيس عرض المنحنى، ويتناسب مع معكوس عدد التجارب. لنرى بشكل أكثر صراحة ما يعني

ذلك فلنعتبر التجربة التى نكرر فيها N مرة السحب على قطعة معدنية؛ حيث N هى عدد مفترض أنه كبير جدًا. فإن الكمية:

$$E= 2 \sqrt{N} \times (\text{«ترددات "الملك"»} - ½)$$

تمثل انحراف بين التردد النظرى 1/2 وتردد عدد الأوجه الملحوظة أثناء التجربة، مضروبة فى عامل إعادة المعيرة renormalisation. لنكرر هذه التجربة ٢٠٠ مرة (يؤخذ هذا العدد لتثبيت الأفكار، ويرجع إلى إلقاء القطعة ٢٠٠ N مرة)، ونوزع الترددات النسبية للنتائج التى تم الحصول عليها للكمية E فى مخطط بيانى Histogramme ، إذن نحصل على رسم بيانى طبقًا *للشكل ١*.

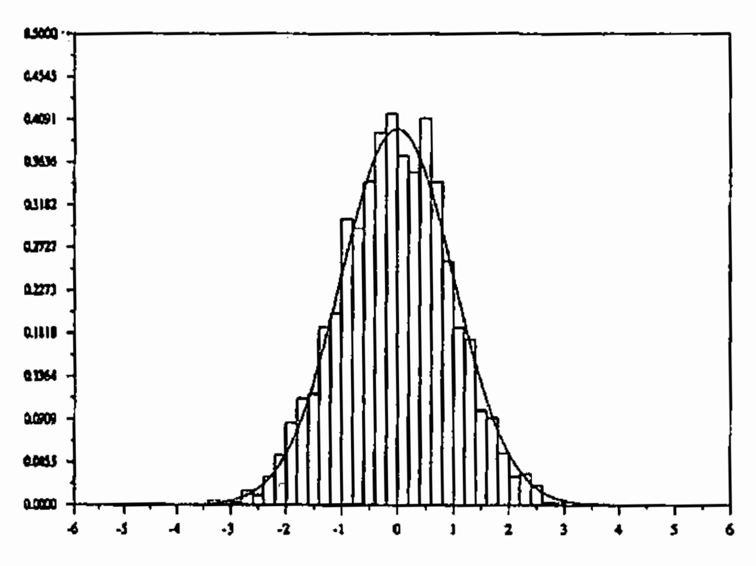
إن القيم الدقيقة لارتفاعات الأعمدة يمكن أن تتراوح بدلالة التجربة لكن هيئتهما العامة تبقى قريبة من منحنى جاوس، الذى هو الرسم البيانى للدالة

$$e^{-x^2/2}$$

المرسومة فى الشكل وتميل أن تنطبق أكثر على هذه الدالة إذا زاد عدد تكرار مرات التجربة أكثر من ٢٠٠ (كما هو الحال هنا)، ومن الملاحظ أن الطريقة التى تتوزع بها النتائج عند النهاية مستقلة عن طبيعة التجربة التى نكررها، وهذه الشمولية لقانون **جاوس** هو أساس إدخاله فى العديد من مسائل الاحتمالات. إن نظرية النهاية المركزية تسمح بإعطاء فترات ثقة للتقديرات المعيارية مثل استطلاعات الرأى بنية الاقتراع، ويسمح قانون جاوس أيضًا بشرح "قانون الأخطاء"، يعنى كون أخطاء القياس فى القيم الفيزيائية، التى لها أسباب عديدة مستقلة عن بعضها، تؤول إلى أن تتوزع حسب توزيع جاوس.

إن قانون الأعداد الكبيرة ونظرية النهاية المركزية اللذين يعتبران نتيجتين رئيسيتين لحساب الاحتمالات كانا معروفين منذ القرن الثامن عشر، ونتج عن تطور نظرية الاحتمالات فى القرن التاسع عشر ثم العشرين مكانة زادت أهميتها شيئًا فشيئًا فى دراسة الإجراءات **الستوكاستيك** stochastique؛ أى الظواهر التى

تتغير بشكل عشوائى مع الزمن. مثلاً من بين هذه الإجراءات الستوكاستيك، اتخذت الحركة البراونية دورًا مركزيًا، سواء من ناحية النظرية أو التطبيقات، وسأتجه فى هذا البحث لعرض الحركة البراونية وشرح لماذا وكيف نستخدمها لنمذجة ظـواهر الصخب. إن تطبيقات التقنية لهذه النماذج عديدة بدءًا من الملاحة الجويـة للماليـة ومرورًا بالاتصالات عن بعد.



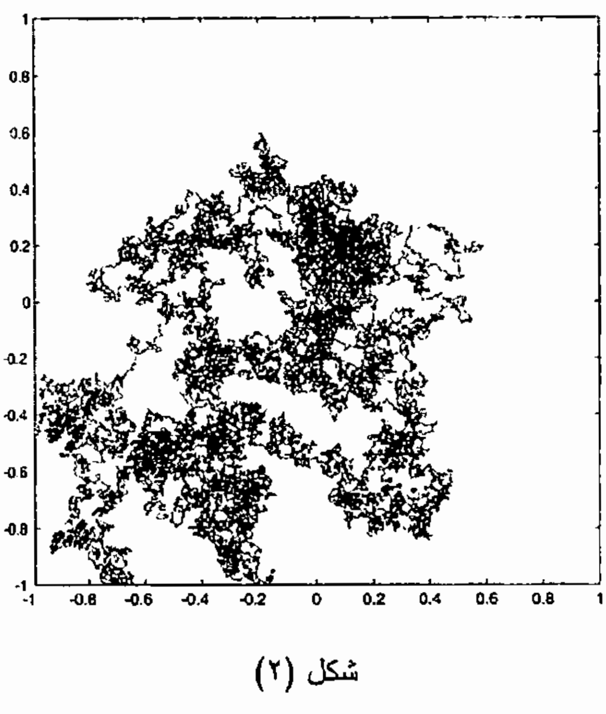
شكل ١

نظرية النهاية المركزية

الحركة البراونية

من البديهى أن ملاحظة الحركة البراونية قديمة مثل اختراع الميكروسكوب، وبالفعل يكفى أن نلاحظ المياه بتكبير كبير؛ لنرى جزيئات صـغيرة تتحـرك فـى حركة غير منظمة ولا تتوقف. إن رجل النبات براون Brown الذى لاحظ جزيئات غبار الطلع Pollen على سطح الماء هو الأول، فى عام ١٨٢٧، الذى عمل وصفًا دقيقًا لهذه الظاهرة وتركها دون اسم، يمكن الحصول على منحنى مثل الموجود فى

شكل ٢ بسهولة بمحاكاة الحاسب الشخصى، وهو يمثل طبق الأصل مسار لجـزئ حيوى *فى* حركة براونية. إن الخاصية غير المنتظمة للغاية لهذه المسارات والتـى تبدو بوضوح على الشكل أثارت فضول هؤلاء الذين لاحظوا هذه الظـاهرة فـى عصر براون، ولقد تم طرح عدة افتراضات عن أصل هذه الحركة، بعـض هـذه الافتراضات من نوع الحيوى vitaliste، وكانت تفترض أن الجزيئات تملك طاقـة خاصة بها تجعلها تتحرك، ولكن الشرح الحقيقى لم يعطِ إلا فى نهاية القرن التاسع عشر، فى حين أن نظرية البناء الذرى للمادة كانت تفرض نفسها علـى العـالم العلمى، وعندما يوضع جسيم صغير صلب فى سائل، فإنه يكون معرضًا لقـذف لا يتوقف من الجزيئات التى تكون السائل هذه الجزيئات صغيرة جدًا بالنسبة للجـسيم (عمليًا حجم الجسيمات التى نتحدث عنها من رتبة الميكرون؛ أى 10^{-3}μm فى حين أن جزيئات الماء مثلاً لها قطر من رتبة بعض الإنجسترومات ولـيكن 10^{-7} μm، ولكن عددها كبير جدًا وسرعاتها موزعة فى الفراغ بشكل موحد الخـواص ممـا يجعل فى التقريب الأول بقانون الأعداد الكبيرة الدفع الناتج لهذه الصدمات منعـدم، كلما صغر حجم الجسيم كلما قل تعرضه للصدمات فى وحدة الزمن وكلمـا زادت حساسيته للانحرافات بالنسبة لقانون الأعداد الكبيرة، بحيث إن تحت حجـم معـين تتوقف الصدمات عن أن تتعوض بدقة وتنتج حركة غير منظمة يتغيـر اتجاههـا بشكل لا يتوقف. إن أينشتاين هو الأول الذى نجح فى أن يجعل من هذه الملحوظـة نظرية فيزيائية كمية، وتم تأكيد نظرية أينشتاين تجريبيًا على يد جون بيـرين Jean Perrin الذى استنتج أول تحديد دقيق لعـدد أفوجـادرو Avogadro (وهـو عـدد الذرات المحتواة فى جرام من الهيدروجين). هذه الأعمال مجتمعة مع أعمال بلانك Planck على إشعاع الجسم الأسود أسقطت التحفظات على الشكوك الأخيرة نحـو النظرية الذرية التى لم تكن مقبولة فى هذا الوقت بإجماع الآراء.



شكل (٢)

مسار جسيم براونى

لقد أعطى أينشتاين فى مذكراته الوصف التالى لحركة براون

ا) بين لحظتين s,t تحرك جسيم براون يكون عشوائى يتبع قانون جاوس للتغير D*(t –s) حيث D هو تابع للخواص الفيزيائية للجسيم مثل: الكتلة والقطر والسائل مثل (اللزوجة ودرجة الحرارة... إلخ)

ب) هذا التحرك مستقل عن المسار الذى قطعه الجسيم قبل الزمن s.

إن الاختلاف فى variance هو قيمة متوسطة لمربع المسافة بين وضعى الجسيم فى اللحظة s,t، لقد أعطى أينشتاين قانون صريح لـ D، وهاتان الخاصيتان توصفان تمامًا السلوك الإحصائى للجسيمات البراونية، وتعد النتيجة مهمة وهى أن الكمية التى يجب قياسها للحصول على بارامتر D هو تغير من الدرجة الثانية quadratique المتوسط للجسيم وليس سرعته غير القابلة للقياس كما

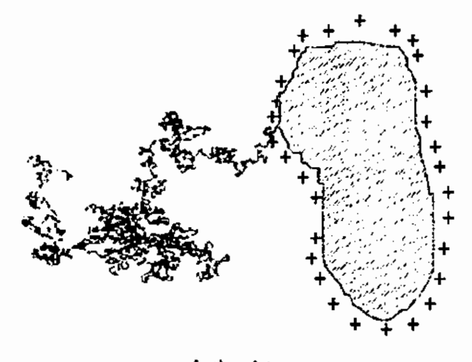
لاحظ منذ زمن المجربين (الذين أجروا التجربة). إنه بقياس القيمة D استطاع جان بيرين Jean-Perrin أن يقدر عدد أفوجادرو. كما سنرى فيمـــا بعـــد، إن قـــوانين أينشتاين عامة جدًا وتشتمل، فى الحقيقة، على عدد كبير من الظواهر أكثر كثيـــرًا من الجسيمات المعلقة فى سائل، وشموليتها لها الأصل نفسه لشمولية قوانين **جاوس** التى تأتى من نظرية النهاية المركزية.

معادلة الحرارة

ينتج من الوصف الذى أعطاه أينشتاين أن احتمال وجود جسيم براونى فـــى نقطة يتبع معادلة مطابقة تحكم انتشار الحرارة نفسه، على الـــرغم مـــن أن هـــذه الظواهر الفيزيائية مختلفة تمامًا الواحدة عن الأخرى وهذا يترجم ماديًـــا بالطريقـــة الآتية، فلنضع كمية من الحرارة المعطاة عند نقطة x من جسم متجانس.

بعد زمن t، هذه الكمية من الحرارة عند توزيعها على الجسم عملت علـــى رفع درجة حرارته عند نقطة y من الجسم كمية قدرها Δt، ولننـــسى الآن درجـــة الحرارة وكمية الحرارة ولنفترض أن جسيم مفعم بالحركة البراونية موضوع عنـــد النقطة x نفســـها، إذن احتمال (أو بدقة أكبر كثافـــة احتمـــال، للمدققين فى اللغة) p(t,x,y) هذا الجسيم يوجد عند نقطة y بعد زمن t تتناســـب مع Δt، بشكل آخر t Δ p (t,x,y) =c، معامل c لا يتوقف إلا على الخواص الفيزيائية للجسم وليس على النقطتين x,y أو على الزمن t. بالإضافة إلى الانتشار الحرارى الحركة فالبراونيـــة مرتبطة أيضًا بقوانين أينشتاين، وبسلوك الشحنة الكهربية فى حالة تـــوازن. هنـــا أيضًا سأعطى مثالاً صريحًا للتفسير البراونى لظاهرة فيزيائية بسيطة موضحة فى *شكل٣*، ولنعتبر جسم موصل مشحون كهربيًا. فى حالة عدم وجود مجال كهربـــى خارجى فإن الشحنات تتوزع تلقائيًا على سطح الجسم تبعًا لهيئة تميل إلى تقلـــيص الطاقة الكهروستاتيكية، وإذا كان هناك الآن جسيم يتبع قوانين أينشتاين وانطلق فى نقطة من الفراغ موضوعة بعيدًا جدًا عن الجسم إذن احتمال أن المكان الذى تمـــس

فيه الجسم لأول مرة يكون نقطة معطاة على السطح؛ هذا الاحتمال يتناسب مع الشحنة الكهربية لهذه النقطة فى هيئة الاتزان، وهذا يسمح بربط سلوك الحركة البراونية ببعض النتائج المعروفة لقوانين الكهروستاتيكا مثل مبدأ الصواعق الواقية: بالفعل إن ميل الحركة البراونية لاكتشاف الفراغ حولها، موضحة فى *شكل* ٢ ، تجعل لديها فرصة عند الاقتراب من جسم تمسه لأول مرة فى منطقة ناتئة. بترجمتها إلى مصطلحات كهروستاتيكية، يعنى ذلك أن الشحنات الكهربية تميل لأن تتركز فى الأطراف مثل حالة الواقى من الصواعق، ولنحدد مرة أخرى أن هذه الظواهر الفيزيائية لا ترتبط فيما بينها سوى على مستوى رياضى بحت، مستوى المعادلات التى تصفها وخاصة حركة الجسيم البراونى المفترض أن تكون مستقلة تمامًا عن الشحنة المحتملة للجسم محل السؤال.



شكل (٣)

شحنة نقطة على سطح جسم موصل تتناسب مع احتمال أن الجسيم البراونى يمس الجسم عند هذه النقطة.

النظرية الرياضية والتطبيقات التقنية

ن. فينر N.Wiener هو الأول فى سنوات العشرينيات من القرن الماضى الذى بين أننا نستطيع تعريف بشكل دقيق مادة رياضية تؤكد قوانين أينشتاين وعلى الأخص قد أثبت أن مسارات الحركة البراونية الرياضية مستمرة ولا يمكن تفاضلها

فى أى مكان، مما يعنى أنه لا يمكن تعريف السرعة للحركة البراونية فى أى لحظة،هذه التغيرات فى الاتجاه كانت سريعة جدًا، ويؤكد ذلك عدم الإمكانية رياضيًا قياس السرعة الملاحظة من قِبل المجربين وهكذا بعكس مواد فيزياء نيوتن الكلاسيكية، لا يمكن وصف الحركة البراونية بمعادلات تفاضلية غير أن من الممكن تطوير حساب تفاضلى نوعى للحركة البراونية، الحساب الاستوكاستيك الذى تم اختراعه لأسباب نظرية بحتة على يد ك. ايتو K. Ito فى الأربعينيات. هذا الحساب التفاضلى يملك قوانين خاصة به مختلفة عن حساب نيوتن ولايبنتز Leibintz، ويترجم صفة عدم الانتظام الشديد للمسارات البراونية، ويعنى ذلك تقدم كبير للنظرية الحديثة لإجراءات الاستوكاستيك التى تلعب دورًا رئيسيًا فى النظرية كما فى التطبيق ولكن يتعدى تمثلها إطار هذا البحث.

إن أصل استخدام الحركة البراونية فى نماذج كثيرة يرجع إلى ملحوظة عملها بأشيلييه Bachelier فى بحثه "تأملات فى المالية" قبل مذكرات أينشتاين فى عام ١٩٠٥ بقليل، ولقد أثبت أن الحركة العشوائية التى أزاحتها فى فترة زمنية شديدة الصغر dt متوسطها صفر وتغيرها d*dt تحقق قوانين أينشتاين، ونستطيع أن نقدم هذه الملحوظة بشكل رياضى دقيق معروف باسم "نظرية التباين" لدونسكر Donsker، إننى لم أصف هذه النتيجة التى تكون نوعًا من النسخة الديناميكية لنظرية النهاية المركزية، ولكنى أريد أن أضع خطًا تحت نتيجة مهمة هى، بعمل افتراضات قليلة جدًا على طبيعة الحركة العشوائية نستطيع أن نظهر أنها تحقق قوانين الحركة البراونية، وأساسًا نستنتج من ذلك أنها كانت مادة معرضة لعدة تأثيرات كلها ذات تركيزات صغيرة مؤثرة باستقلالها عن بعضها البعض وبثبات تسلك كجسيم براونى؛ مما يبرر اللجوء للحركة البراونية الرياضية لنمذجة تأثيرات الاضطرابات perturbations العشوائية للصخب، التى طبيعتها الدقيقة وبناؤها المفصل ليس معروفين. هذه النماذج تجد تطبيقات تقنية كثيرة، وكذلك توجيه الصاروخ أو القمر الصناعى يتم تنفيذه عن بعد بتغيير فى المسار بدلالة معطيات منقولة عن طريق مستقبلات موضوعة على سطحه. إن الصاروخ ينحرف

باستمرار عن مساره النظرى باضطرابات صغيرة متنوعة المصدر بسبب المناخ مثلاً، أو التراوحات المحلية لمجال الجذب الأرضى، أو الاتصالات بين الصواريخ والقاعدة التى أيضًا أصابتها الضوضاء من مصادر كهرومغناطيسية، كل هذه الاضطرابات لا يمكن وصفها بدقة لكن من الطبيعي لأسباب سبق ذكرها اللجوء إلى الحركة البراونية لنمذجتها، ونستطيع استخراج فيضًا مستمرًا من المعلومات التى ترسلها الصواريخ مركبة بسبب الضوضاء ونعيد بناء أحسن تقريبًا ممكنًا للمسار الحقيقى. إن مرشح كالمان- بوسى Kalman –Bucy هو الطريقة الأكثر قدمًا المستخدمة لحساب الضوضاء والذى أدى خدمة خاصة أثناء رحلات أبوللو الأولى من ناسا، ومنذ هذه الحقبة أحدثت نظرية الترشيح تقدم فى حل المسائل غير الخطية؛ حيث إن الملاحظة لم تعد تتوقف خطيًا على الإشارة المرسلة مع تطبيقات مهمة فى مجال الاتصالات.

إن الفكرة الأصلية لباشلييه Bachelier، والتى كانت نمذجة عن طريق مسارات الصدفة لدورات النواحى النشطة فى البورصة والتى عرفت تطورًا رائعًا فى السنوات الأخيرة، وتعد الحركة البراونية من الآن فصاعدًا جزءًا من أدوات المالية كذلك قانون بلاك Black وشول Scholes يستخدم الآن عالميًا لحساب قيمة الاختيارات المقترحة على الأسواق المالية، ولنتذكر أن الاختيار هو عقد وتحقيقه متروك لتقدير العميل، مثلاً اختيار شراء لمدة ستة أشهر على قيمة الدولار، إن العقد يسمح لعميل بنك ما أن يشترى لمدة ستة أشهر بعد تاريخ العقد كمية من الدولارات بمعدل تغير ثابت فى العقد، ومن البديهى أن العميل لا يستفيد من ممارسة ذلك الاختيار إلا إذا كان العرض الثابت فى العقد أقل من سعر الدولار السارى، ومثل هذا الاختيار يمثل عقد ضمان مقابل التراوحات لمعدلات التغيير ويجب إعطاء فرصة للعميل للدفع بالقسط، والتى حسابها مادة قانون بلاك وشول، وهذا القانون نحصل عليه، عن طريق تفكير مبنى على حساب أستوكاستيك، الذى يستخدم نموذج للدورات النشطة المختلفة للحركة البراونية أو إجراءات أستوكاستيك قريبًا جدًا. البراميتر D لقوانين أينشتاين والذى يسمى هنا قابلية التبخر، هو قياس

لأهمية تراوحات الدورات، والتى يمكن تقييمها إحصائيًا، والذى تغيرها عبر الزمن يمكن أن يؤخذ فى الاعتبار نماذج أكثر رقيًا. نؤكد مرة أخرى على حقيقة أن هـذه التطبيقات ما كانت ترى النور دون تطور أدوات نظرية قادرة اخترعها إيتو.

آفاق معاصرة

من الممكن اعتبار حركات براونية تحدث فى فراغات أكثـر تعقيـدًا مـن الفراغ الإقليدى العادى، مثل الفراغات المنحنية (مما يمكن ترجمته بتغيير معامـل D مع المكان الذى يوجد فيه الجسيم واتجاهه وحركته)، هذه الفراغـات مـزودة ببناءات جبرية مثل: الزمر، فراغات كسورية أو أيضًا فراغات تكوينها عـشوائى، مثلاً لنمذجة وسط يحمل شوائب. يعكس سلوك الحركة البراونية جزءًا مـن بنـاء الفراغ الذى بين أيدينا، ونستطيع أيضًا الاهتمام بـسلوك العديـد مـن الجـسيمات البراونية المتفاعلة فيما بينها أو العرضة للموت والحياة مرة أخرى، مثـل بعـض نماذج الأحياء، وكل هذه التعميمات تكون مادة أبحاث نشطة ولكن الحركة البراونية العادية مازالت تخفى المزيد من الغموض، إلا أن الأسئلة التى نطرحها فـى هـذا الموضوع (الحركة البراونية) والأدوات المستخدمة فى الدراسة تتوقف بقوة علـى بعد مسارات الفراغ الذى تتغير فيه. إذا كان بعد الفراغ يساوى ١ فتكوين نظام خط الأعداد الحقيقى يسمح باستخدام طرائق توافقية، كذلك نظرية الدوال الخاصة فـى ارتباط مع المعادلات التفاضلية العادية. فى البعد ٢، التحليـل المركـب ونظريـة الدوال التحليلية هى التى تسود، والمقصود هنا مجالات أبحـاث شـديدة الحيويـة، وسأنهى هذا البحث بذكر نتيجة رياضية حصلنا عليها مؤخرًا. إن اختبار *الشكل ٢* يبين الخاصية شديدة التعرج للمنحى البراونى، ويمكن أن نعطى قياسًا لتركيب هـذا المنحنى بإعطائه عدد يسمى بعد هاوسدورف Hausdorff الذى يمكن بسهولة إثبات أنه يساوى ٢، مما يعنى أن المنحنى البراونى له كثير مـن خـواص الفـراغ ذى البعدين، وطرف هذا المنحنى هو أيضًا شىء مركب، ولكن أقل من المنحنى ككل، ولقد خمن مندلبروه Mandelbrot منذ عشرين عامًـا علـى ثقتـه فـى محاكـاة

المعلوماتية أن بعد هاوسدورف Hausdorf لهذا الطرف يجب أن يساوى 4/3. فالمسألة أكثر تعقيدًا بكثير من المسألة التى يدرس فيها المنحنى بكامله ولكن تم حلها بفضل أعمال و. فرنر W.Werner وأو. شرام O.Schramm، وجى. لاولر G.Lawler. وظهور عدد نسبى بسيط كما هو الحال هنا فى 4/3 فى مسألة بهذا التعقيد هى تصوير لوجود تماثل عميق تحتى، وهذا التماثل الذى نتحدث عنه فى المسألة يحمل اسم "تباين مطابق" variance conforme، ويبدو أنه يرتبط بشكل غامض بالنسبة للرياضيين، بنظريات الفيزياء، مثل النظرية الكمية للمجالات، التى تميل إلى وصف تكوين المادة فى مستواها الأكثر بدائية، وإنه لا يشكك فى أن اكتشاف هذه العلاقات سيوسع مكانًا لاكتشافات أساسية حديثة.

المراجع:

Ouvrages généraux

– N. Bouleau, *Martingales et marchés financiers*, Paris, O. Jacob, 1998.

– C. Bouzitat, G. Pages, *En passant par hasard : probabilités de tous les jours*, Paris, Vuibert, 1999.

– I. Eckland, *Au hasard, la chance, la science et le monde*, Point Sciences, Paris, Le Seuil, 2000.

– J. Perrin, *Les Atomes*, Paris, Gallimard, 1970 (réédition).

– H. Poincaré, *Calcul des probabilités*, Paris, Éd. J. Gabay, 1987 (réédition).

Quelques ouvrages plus spécialisés :

– P. Lévy, *Processus stochastiques et mouvement brownien*, Éd. J. Gabay (Les grands classiques Gauthier-Villars), 1992 (réédition).

– B. Oksendal, *Stochastic Differential Equations*, Berlin, Springer Verlag, 1998.

– D. Revuz, M. Yor, *Continuous Martingales and Brownian Motion*, Berlin, Springer Verlag, 1991.

الفراغات المنحنية[٦٢]

بقلم: جان-بيير بورجينيون
Jean-Pierre BOURGUIGNON

ترجمة: مها قابيل

إن طموحى أن أدخلك من خلال رحلة رياضية عبر الفراغات المنحنيةespaces courbes إلى الطرقات التى سلكها الرياضيون حتى يصلوا إلى هذا المفهوم – مفهوم الفراغات المنحنية – فى نهاية القرن الثامن عشر وما فعلوه لاحقًا، وفى النهاية أقترح عليكم اكتشاف مجالات متنوعة جدًا من العلوم تستخدم الفراغات المنحنية اليوم لعمل نماذج للحقائق المتنوعة.

وخلال هذه اللمحة التاريخية سنقابل فى طريقنا الهندسات اللاإقليدية، التى يعتبر ميلادها من اللحظات العظيمة فى تاريخ الرياضيات. ولقد كثرت فى الفترة الراهنة التطورات التى وسعت مفهوم الفراغ المنحنى من وجهة نظر استخدامه فى اتجاهات متنوعة جدًا يرتبط بعضها ذاتيًا بعلم الرياضيات بينما يرتبط البعض الآخر باهتمامات خارج مجال الرياضيات.

فى رحلة البحث عن الفراغ المنحنى المفقود

لتحديد المشكلة التى يطرحها مفهوم الفراغ المنحنى يمكننا محاولة الانطلاق من اصطلاحين لهذا التعبير؛ لذلك فإن تتبع شبكة القراءات التى يقترحها علينا بعض الكتاب تعطى طبعة "الروبرت الصغير" Petit Robert الصادرة فى عام ١٨٩٠ التعريف التالى لكلمة فراغ: «هو مكان غير محدد حيث يمكن أن يجرى شىء ما» ويستعيد الروبرت الصغير بشكل أكثر التباسًا والذى وضعه إيمانويل

---

(٦٢)نص المحاضرة رقم ١٧٩ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٧ يونيو ٢٠٠٠.

كانط "Emmanuel Kant" الفراغ بشكل أوليًا حساسية خارجية". أما النسخة الأحدث من الروبرت الصغير تأخذ ضمنيًا الفعل بمد مفهوم الفراغ الذى أفرز فى الرياضيات (بدون عمل إرجاع فى ذلك الوقت) بطرح معنى متسع لكلمة فراغ فى شكل (وسط مدرك عن طريق تجريد الفراغ العادى)

أما تعريف قاموس الروبر الصغير Petit Robert لكلمة منحنى لا تسمح فعلاً بمعرفة المفهوم"فراغ منحنى" فنجد فى صفة منحنى: "الذى يغير اتجاهه دون تغيير الزاوية، الذى ليس مستقيمًا" إذن ترجع ضمنيًا لنص وحيد البعد، فى حين أنه كى يتواجد بشكل غير تافه فإن الفراغ المنحنى يجب أن يكون على الأقل ذا بعدين"، أما جوليان جراك Julien Grac، فقد قدم فى كتابه أدب المعدة، رؤية أكثر أهمية تعطينا الحق فى الحديث عن الفراغات المنحنية. يقول:(٦٣) "...مثل الذى يغوص فى الرمل ويرفع يده بشكل جنونى، خارج الرمل قبل أن يركن لليلة، كان هناك بشر فى العالم فى جدال صبور، وفى ثورة الغضب الأحمر يقولون ليكن الفراغ منحنى كما أراده أينشتاين، ومكلفين من جهات إعلامية للسخرية الغاضبة من انجراف القارات"

إن بعض رسامى القرن العشرين مثل: ديلونى Delaunay وفازارلى Vasarely قد أعلنوا العصيان بتقديم فراغات منحنية أو استخدامها لتصوير حقيقة أخرى داخلية أكثر.

إن"ظهور التكعيبية" لجليز Gleizes تعرض لهذا الشكل مباشرة باسم الحاجة كى تكامل فى مجال الرسم الحديث مجالات أخرى من المعرفة غير الحدس المحسوس المباشر.

---

(٦٣)إننى أشكر برنارد سركيلينى الذى جعلنى أنتفع فى وضع هذا النص من الامكانيات الضخمة لكنز اللغة الفرنسية وهو مشروع هو مسئول عنه.

من جانب إقليدس

نشر إقليدس Euclide في القرن السابع – السادس قبل الميلاد (قبل عصرنا) **العناصر** les Elements أحد أكثر الأعمال تأثيرًا في تاريخ البشرية؛ حيث استخدم تناول"مركب" للهندسة فيها النقط، والخطوط المستقيمة، والمستويات معرفة في شكل مسلمات كل على حدى كذلك مختلف"علاقات الإسقاط" فيما بينهم: نقطة على خط مستقيم، أو نقطة التقاء خطين مستقيمين. إن خطين مستقيمين يقال عنهما متوازيان حسب تعريف إقليدس إذا لم يكن لديهما نقط تلاقي على طول امتدادهما. ضمن المنحنيات التي تلعب دورًا مهمًا في هندسة إقليدس نجد الدوائر؛ أي فئة من النقط تبعد بمقدار ثابت عن نقطة معينة، وهو مركز الدائرة، وأكثر عمومًا نجد الأشكال المخروطية، وهي منحنيات ناتجة من تقاطع مخروط بمستوى والمعروف منها القطوع الناقصة والزائدة والمكافئة. تبعًا لوضع المستوى القاطع بالنسبة لمحور المخروط.

نجد في كتاب **العناصر** المسلمة التي سببت نقاشات كثيرة عبر القرون وهي: "مسلمة المتوازيات" الشهيرة التي تشترط أن "من نقطة خارجة عن خط مستقيم، يمر خط واحد وواحد فقط من هذه النقطة موازي للخط الأول. حدثت محاولات عديدة لإثبات أن هذه المسلمة يمكن استنتاجها عن طريق مسلمات سابقة، وبالتالي تصبح "نظرية" في الهندسة، وهذا السؤال المهم أولاً من الناحية الأكاديمية الخالصة قد لعب دورًا مهمًا في ميلاد مفهوم الفراغ المنحني، الذي هو قلب الموضوع.

لإدخال مفهوم الانحناء نهتم بالمنحنى الناعم C المرسوم في مستوى، ولنأخذ نقطة P على هذا المنحنى ولنحاول تقريب المنحنى في جوار هذه النقطة بمنحنيات بسيطة مثل خطوط مستقيمة ودواير.

أول شرط طبيعي وبديهي أن هذه المنحنيات تمر بـ P والمستقيم المار بـ P يعطي أحسن تقريب ويكون مماس لـ C عند P؛ أي أن حدود المستقيمات المارة بنقطة P وتقطع C مرة أخرى في نقطة أخرى أقرب وأقرب لـ P، والدوائر

المارة بـــ P ومتمركزة على المستقيم العامودى على C عند P (أى متعامدين على المماس على C عند P) وكلها مماسات للمماس عند P وعمومًا فإن نقط المنحنى C فى جوارP كلها خارج الدوائر ذوات الأنصاف الأقطار صغيرة جدًّا والتـــى يقـــع مركزها على العامودى، وكلها داخل دوائر ذات أنصاف أقطار كبيرة جدًا والتـــى تبتعد مراكزها فى اتجاه ما، ويوجد بالفعل دائرة ودائرة واحدة فقط التى لها خاصية أن بعض نقط المنحنى المجاورة لـــ P تكون داخل هذه الدائرة والأخرى خارجهـــا وتسمى هذه الدائرة "دائرة الانحناء" ونصف قطرها هو "نصف قطر الانحناء" نـــق للمنحنى عند هذه النقطة، وتعتبر هذه الكمية ثابتة لوصف سلوك المنحنى فى جوار P؛ لأنه يصف كيف أن المماس للمنحنى يلف فى هـــذا الجـــوار، وتجلـــب دائـــرة المنحنى تقريب لرتبة أكثر ارتفاعًا فى جوار P: ونقول إنه"مماس" لـــ C عنـــد P، ونستطيع أن نجد على المنحنى نقاط خاصة تسمى نقاط الانعطاف؛ حيـــث مركـــز دائرة المنحنى محذوف إلى ما لا نهاية، ومن المريح فى هـــذه الحالـــة اعتبـــار أن المماس عند P هو دائرة الانحناء.

من المفهوم أن فى المنحنيات الخاصة مثل المستقيمات، تحدث هذه الظاهرة عند كل نقطة، وفى الدوائر تحدث ظاهرة أخرى: فتكون دائرة الانحناء الخاصة به عند كل نقطة.

جانب جوتنجن Gottingen

كى نتقدم على الطريق المؤدى إلى مفهوم الفراغات المنحنية، لنأخـــذ فـــى الاعتبار جزءًا من السطح الأملس لـــ S فى الفراغ العادى ثلاثى الأبعاد. إننا نريد أن نعرف بناء S فى جوار أحد نقاطه ولتكن P، ولهذا الغرض سنتبع المنهج نفسه الذى اتبعناه فى منحنى بمستوى، وأفضل مستوى يقرب سطح S فى جـــوارP هـــو المماس عند P، والعامودى على S فى هذه النقطة هو المـــستقيم المتعامـــد علـــى المستوى عند P، وتقاطع S مع المستوى المحتوى للعامودى يعتبر منحنـــى لهـــذا

المستوى نستطيع أن نطبق عليه النقاش الدائر فى الفقرة السابقة، ولكل مستوى عامودى P (مستوى يشمل العامودى على S عند P) نستطيع أن نعرف نصف قطر الانحناء للسطح S عند P المرتبط بهذا المستوى والذى نسميه R_p بالفعل سيكون أكثر راحة العمل مع الانحناء K_p، الذى ليس سوى معكوس نصف قطر الانحناء ($K_p=1/R_p$) ونسمى K(P) الكبرى القيمة العظمى التى يأخذها المنحنى عندما يقطع المستوى P كل الخطوط المتعامدة عند P، و K (P) الصغرى هى قيمته الصغرى، ومن المناسب هنا أن نختار اتجاه السير على العامودى عند P، بما يسمح بإضافة إشارة للانحناء موجبة إذا كان مركز دائرة الانحناء فى اتجاه سير العامودى، وسالبة إذا كان العكس وتتغير قيم K العظمى و K الصغرى عندما نغير اتجاه السير.

إن النظرية التى تؤسس لمفهوم الفراغ المنحنى هى Theorema Eregium لكارل فريدريتش جاوس Carl Friedrich Gauss، ويعتبر هذا الرياضى أحد أعظم الوجوه الرياضية فى القرن التاسع عشر، وكان أستاذًا فى جامعة جوتنجن. ولقد نشر فى عام ١٨٢٧ "مناقشات عامة على المنحنيات المرسومة على أسطح" المكتوبة بالإيطالية، ولكننا نعلم أن جاوس كان لديه برهان له قبل ذلك بـ ٢٥ عامًا مما يعطينا تفسيرًا جميلاً للمقولة "Pauca sed matura"[٦٤] بوكا سد ماتيرا الذى اعتدنا على تسميته أمير الرياضيات. إن نظرية Theorema eregium تؤكد أن (حاصل ضرب أكبر قيمة للانحناء فى أصغر قيمة؛ أى $K_{max}(p).K = K(P)$ $_{min}(p)$ تعتبر خاصية ذاتية)، بمعنى أنها تدخل فى قياسات معمولة للأسطح دون أى استدعاء لبناء على طول الأعمدة، ويعتبر ذلك مفاجئة بالنظر للطرائق التى سلكناها للوصول للانحناء، وتقول النظرية إن الفراغ المكون من السطح S يفرز هندسة خاصة بالفراغ المحيط، والذين هم مرغمون على عدم ترك S، ولن يكون لديهم مفهوم البعد الثالث، لن يعرفوا سوى هذه الهندسة، التى ليست إقليدية.

---

(٦٤)تعنى هذه العبارة "قليل ولكنه ناضج" وقد وردت فى إحدى المسرحيات واستخدمها جاوس بعد ذلك ليعبر عن تقديره لعجائب العلم والظواهر الطبيعية وقدرته على فهمها.

إن ظهور الهندسات الحديثة كان نتيجة لتكثيف الأبحاث على مسلمة المتوازيات، ونضوج معقول للأفكار الهندسية، على الهندسة التفاضلية (مثل الأبحاث التى ناقشناها والتى أدت إلى Theorema Eregium) ولقد أدخلت بمسيرة إبداعية خاصة تبعها بشكل مستقل عدة أشخاص: نيكولاس لوباتشفسكى Nicolas Lobatcheveski الأستاذ فى جامعة قزان والذى نشر فى ١٨٣٥ "الهندسية التخيلية"Géométrie imaginaire والأبحاث الهندسية فى نظرية المتوازيات Geometrische Untersuchungen der Theorie des "Parallellinien" وجانوس بوليا Janos Bolyai، عسكرى صغير ابن صديق لجاوس هو وولفجانج بوليا Wolfgang Bolyai، الذى نشرت أبحاثه كملحق لعمل أبيه عن علوم الفضاء، وكذلك كارل فريدريتش جاوس، الذى دون أن يصل إلى حل شكلى للنظرية، يعتبر قطعًا هو الذى أدرك بوضوح كل الموضوع.

على ما تحض هذه الثورة؟ مع ظهور كل هذه الهندسات، ليس أقل من نهاية نموذج وحيد للهندسة التى هى موضوع السؤال؛ أى نهاية حقبة استمرت ألفين سنة.

كيف يمكن أن تستوعب هذه الأفكار الحديثة؟

من المفيد فعلاً الاهتمام دفعة واحدة، وعلى التوازى، بثلاث هندسات نموذجية.

الهندسة الإقليدية

إننا نعرف جيدًا المثلثات فهى أشكال رمزية للهندسة الإقليدية: بإعطاء ثلاث نقط ا،ب،ح يكون المثلث ا ب ح له ثلاثة جوانب وهى القطع المستقيمة اب، ب ح، اح والزوايا عند ا، ب، ح لها قياسات يمكن أن نرمز لها بالرمز α، β، γ، وينتج من مسلمة التوازى، أن مجموع زوايا المثلث الإقليدى تكافىء تمامًا زاويتين

قائمتين، ولتكن ١٨٠° والتى نعبر عنها بـــ$\alpha + \beta + \gamma = \Pi$ (أما إذا قسنا الزاويـــة بالراديان radian وهى الوحدة التي يفضلها الرياضيون) فإن تقنية الحـــساب التـــى تسمح بحساب كل ما نتمناه فى المثلثات الإقليدية هى"حساب المثلثات".

الهندسة الكروية

لقد تم تطويرها منذ زمن على يد الفلكيين الذين يضبطون أوضـــاع النجـــوم على نصف الكرة التى هى القبة السماوية، ولكن منذ القرن التاسع عشر لـــم يحلـــم أحد بوضع هندسة فى ذاتها يمكن أن تنافس الهندسة الإقليدية؛ لذلك يجب أن نأخـــذ وجهة النظر التى تعتبر الشكل المحدد بثلاث نقط ا، ب، ح مثلث كـــروى جوانبـــه مكونة من قطع من دوائر عظمى على الكرة الموصلة ما بـــين رؤوســـه: أقـــواس الدوائر العظمى تحدد بثلاث زوايا α،β، γ مثل الحالة الإقليدية، ويجب ملاحظة أنه كما فى الحالة الإقليدية، جوانب المثلث الكروى هى أقصر الطرائق التى تصل بين رؤوسه: والدوائر العظمى هى مستقيمات هذه الهندسة، وبالفعل فإن هذه الهندســـة ترضى مسلمات الهندسة الإقليدية، فيما عدا مسلمة التوازى بما أن كل المـــستقيمات أو الدوائر العظمى تتقاطع فيصبح من المستحيل إيجاد موازى لمـــستقيم مـــا مـــار بنقطة خارج هذا المستقيم.

ولتكن كرة نصف قطرها ١ فإن القانون الرئيسى الذى يـــأتى ليحـــل محـــل القانون الإقليدى التقليدى يكون $\alpha+\beta+\gamma = \Pi$ + مساحة المثلث ا ب ج (وهنا نجد ميزة استخدام الراديان radian.)، ويوجد إذن زائد زاوى فى الهندسة الكروية.

لقد وضع الفلكيون منذ عدة قرون تقنية للحـــساب تـــسمح بتعمـــيم حـــساب المستوى فى هذا النطاق وهو ما نسميه حساب المثلثات الكروى. ومثلما يحدث فى حالة أن كل نقطة خارجة عن المستقيم (نعنى هنا دائرة عظمى) لا يمكـــن إيجـــاد مستقيم لا يقطع مرة أخرى المستقيم المعطى؛ ولأن كل الدوائر العظمى تتقاطع فى نقطتين متقابلتين،هذه الهندسة تطبق مسلمة المتوازيات. مما يبرهن بشكل لا لـــبس فيه أو غموض استقلال مسلمة التوازى عن المسلمات السابقة.

تقدم الهندسة الكروية بعض الخواص المفاجئة التي تستحق أن نتوقف عندها، لدرجة أن هندسة من هذا النوع يمكن أن تكون مهمة في مواقف أخرى مثل التي سنوضحها فيما بعد، ولنضع أنفسنا في نقطة من الكرة يمكن اعتبارها القطب الشمالي للكرة لتسهيل النقاش، مما لا يعتبر مزعج؛ حيث إن كل النقط متكافئة في هذه الهندسة. ماذا نرى عندما ننظر إلى كل الاتجاهات من هذه النقطة؟ لنأخذ التشابه في حالة انتشار الضوء في أقصر الطرق، كل الأشعة الضوئية الخارجة من القطب الشمالي ستتقاطع في القطب الجنوبي. ونتيجة ذلك إنه إذا اتبعنا طريق أشعة الضوء في الاتجاه المعاكس من كل اتجاه واصل للقطب الشمالي سيصل شعاع صادر من القطب الجنوبي، مولدًا صورة لهذه النقطة، ومن المهم ملاحظة أن تكاثر الصور للنقطة نفسها تعتبر ظاهرة مستحيلة في الهندسة الإقليدية، وقد استغلها الرسامون التكعيبيون أمثال: بيكاسو Picasso وديلوناى Delaunay.

هندسة القطوع الزائدة

إنها الهندسة التي أدخلها نيكولاس لوباتشفسكي وجانوس بوليا والتي غيرت بظهورها المفهوم الذي كان لدينا للهندسة ووضعت نهاية للسيطرة المطلقة للهندسة الإقليدية. ولم يكن متاح أي نموذج بسيط لهذه الهندسة أثناء تقديمها، مما أصاب لوبا تشفسكي بأحر الانتقادات، وأكثرها رعونة، ولقد افترض الريادي الإيطالي أوجينيو بلترامي في عام ١٨٦٨ طريقة فعالة وطبيعية لتقديم هذه الهندسة، وعدم وجود البساطة في النماذج الأولى ساعد على عدم انتشارها والتعرف عليها، ولم يكن الأمر سوى كسر العادات التي استمرت لآلاف السنين، ويمكن تقديم نموذج "بلترامي" Beltrami كما يلي: إن الفراغ هو ما بداخل إسطوانة مستوية نصف قطرها ١. والخطوط المستقيمة هي دوائر إقليدية لهذا المستوى تكون متعامدة على الدائرة الطرفية التي نصف قطرها "١" وقياسات الزوايا هي القياسات المعتادة، أما قياسات الأطوال ليست القياسات الإقليدية. إشارة بديهية لهذا الاختلاف إن الدائرة التي نصف قطرها ١تمتد إلى ما لا نهاية في هذا الفراغ، أي أن الأطوال "القطوع

الزائدة" فى تناسب يأخذ فى الكبر بالنسبة للأطوال فى الهندسة الإقليدية كلما نقترب من الطرف، فعندما تقترب رأس المثلث من الطرف حيث نكون ثبتنا الرأسين الآخرين، فإن الجانبين الخارجين من هذا الرأس يشكلون زاوية تأخذ فى الصغر بحيث إن إذا طبقنا هذه العملية على التوالى على الرؤوس الثلاثة، فإن مجموع زوايا المثلث (القطوع الزائدة) يمكن أن نجعله صغيرًا اختياريًا، وأقصى إظهار لحقيقة أنها أصغر دائمًا من ط. مثل الحالة الكرية، العيب فى ط يأتى من المساحة (القطع الزائد) للمثلث ا ب ج، ولكن هذه المرة بإشارة مختلفة (شرطة كما سنرى فيما بعد، من منطلق أن هذه الهندسة ذات انحناء سالب).

لقد انتهكت مسلمة التوازى فى هذه الهندسة، ولكن لسبب آخر مختلف عن الهندسة الكرية: من نقطة خارج" مستقيم القطع الزائد" يوجد عدد لا نهائى من "المستقيمات القطوع الزائدة" متوازية فيما بينها، لمعرفة كل الدوائر المتعامدة على دائرة الوحدة والتى تقاطعاتها معها تقع على القوس المحدد "بالمستقيم القطع الزائدى" المعطى من جانب النقطة المعطاة.

ريمان وريتشى – كورباسترو

لقد حقق برنارد ريمان Bernard Riemann فى عام ١٨٤٥ خطوة مهمة للهندسة بمناسبة درسها الأول، ولقد عرض لموضوع تم اختياره من قبل المحكم قبلها ببضعة أسابيع فقط، وكانت فى هذه الحالة مقدمة من كارل فريدريش جاوس ولم ينشر هذا النص إلا بعد وفاته فى عام ١٨٦٦ بعنوان "المعطيات التى بنيت عليها الهندسة" تسمى هذه الهندسة اليوم «هندسة ريمان»، والفكرة الرئيسية جديدة جذريًا، ترجع لبرنارد ريمان، وهى إدخال قياس يعتمد على نقطة، لقياس طول المنحنيات، ومن المهم إيجاد بديلات المستقيمات وهى الجيودسك[٦٥] أو المنحنيات التى تحقق أقصر الطرائق لنقط قريبة من بعضها بما يكفى، وعلى الرغم من أن

---

(٦٥)جيودسك هو علم مساحة الأرض والمقصود هنا خط منحنى.

ريمان قد طور ضمنيًا كل الأدوات اللازمة لهندسته، فبعد ثلاثين عامًا أحال ريتشى كورباسترو Gregorio Ricci -Curbastro هذه الأدوات للشفافية، وأحد الخــواص المهمة لهندسة ريمان أنها تضم الهندسة الإقليدية (الحالة التى يمكن أن نجــد فيهــا إحداثيات يكون قياسها ذو معاملات ثابتــة) وأيــضًا الكرويــة والقطــع زائديــة، واللامتغير invariant الرئيسى الذى يقيس انحراف هندسته عن هندسة إقليدس هو امتداد tensor الانحناء لريمان وهو أداة رياضية معقدة يمكن حسابها طالما القياس معطى بوضوح، وبفضل هذه الأداة يمكن إيجاد الانحناء بالشكل الذى قدمه كــارل فريدريش جاوس، ولعمل الصلة لنأخذ "الدوائر" فى قطاع من هــذه الهندســة ذات البعدين: تعرف الدائرة دائمًا مثل الشكل C_r المكون من نقط تبعد مسافة r عن نقطة p(r صغيرة بما يكفى إذا كنا نريد أن نكون متشددين). طــول الــدائرة C_r يــسمح بتطوير $2\Pi\ (r - 1/6\ k\ p\ r^3 +....)$ بطريقة أخرى فإن الانحناء K_p يبدو كانحراف رئيسى بين طول الدائرة فيما بين القيمة الإقليدية والقيمة الريمانية (بمعامل عالمى-1/6) مما يعطى الفرصة للكائنات المقيدة بالعيش على سطح S والتى لمحنا لها من قبل، إمكانية اكتشاف هندسة غير إقليدية.

يمكن تعريف الهندسة الإقليدية بهندسة ريمانية منعدمة الانحناء، والهندسات الكرية والقطع زائدية بهندسات ريمانية بانحناء ثابت موجب وسالب مــع مراعــاة الترتيب.

المرنة أو أينشتاين متحققًا

هذه الهندسات الحديثة ظهرت لتكون فى إطار الفكر المكيف لمعالجة مختلف النظريات الفيزيائية.

ونجح ألبرت إينشتاين Albert Einstein فى عمل مثــل هــذا التخــصيص لنظريته النسبية العامة، فبفــضل نقاشــاته مــع مارســيل جروســمان Marcel Grossman زميل فى مدرسة ETH بزيورخ الذى أعلمه بوجود أعمــال ريتــشى

كورباسترو المكملة لأعمال ريمان. من وجهة نظره فإن قوة الجاذبية ليست سوى تأثيرات هندسية مرتبطة بانحناء الزمكان espace-temps والتى يسببها وجود الكتل: هندسة الزمكان تحدد بتوزيع المجالات الفيزيائية، وعن طريق معادلة أينشتاين. هذه المعادلة المهمة فى النظرية تربط ما بين هندسة الزمكان **بالامتداد** الخاص بالدفع طاقة impulsion-énergie الذى يعبر عن فيزياء التفاعلات الأخرى غير الجاذبية مثل: الكهرومغناطيسية أو القوى النووية فى هذا السياق فإن أقصر الطرائق ليست سوى مسارات الأشياء فى السقوط الحر. إن الأدوات التى طورها ريمان وريتشى كورباستر قد وجدت استخدام لها فى إطار نظرية النسبية العامة، موضحة المرونة الملحوظة لهندسة ريمان.

إن بعض التأثيرات الفيزيائية التى لم تتنبأ بها نظرية نيوتن للجاذبية تسمح لنا باختبار نظرية أينشتاين؛ مثلاً حالة انحراف أشعة الضوء بسبب نجم ضخم الكتلة، فى جوار الشمس أثناء الكسوف، أو نراها بشكل أوضح فى أشعة **البلسار** pulsars الثنائية، أزواج من النجوم كثيفة جدًا. وبفضل الصور التى التقطها هابل وهو تلسكوب حديث فى مساره حول الأرض فإننا نضع الآن صور (لعدسات الجاذبية) أى صور متعددة لنجمة تمر أشعتها فى جوار كتلة كبيرة جدًا (غالبًا غير مرئية لأنها لا تشع) إنها إظهار لمناطق الفراغ زمن ذو الانحناء الموجب بسبب وجود كتل كبيرة الحجم، وهى إظهار فيزيائى فلكى للرؤية التكعيبية لرسامى بداية القرن، ومن المهم ملاحظة أن هذه التصحيحات النسبية مهمة لزيادة دقة نظم الكشف (gps) (نظم تحديد الأماكن الكونية) والذى هو اليوم أقل من مائة متر، إلى مستوى أعلى وليكن بعض المليمترات فى السنة وهى لازمة لمراقبة أطراف الشق فى مناطق الزلازل.

اللونية

هناك فراغ كان قد أعلن عن أهميته منذ بدايات انتشار الهندسة، إنه فراغ **الألوان** espace des couleurs. وأصبح شىء عادى الآن أن نقول إنه يمكننا

الحصول على أى لون من تركيب الألوان الثلاثة الرئيسية، دونما الحاجة لكل المعلومات التى يعطينا إياها تحليل الضوء بالمنشور، وبدقة أكثر، إذا كنا لا نهتم بغير نوعية اللون، فإن كل لون يمكن ضبطه ببارامترين (نسب اثنان من الثوابت الأصلية) والثالث يشير إلى الكثافة، ويبدو فراغ الألوان هكذا كجزء من مستوى المسقط الحقيقى إنها الترجمة الحرفية الرياضية لرؤية الرسامين الماثلة منذ عصر النهضة، ولقد عبرنا خطوة هندسية إضافية بتزويد فراغ الألوان بمقياس يستند على تمييز اقتراب الألوان، وهو مفهوم على الرغم من كل موضوعية، مثلما نتذكر مرض مثل عمى الألوان، فإنه شكل من التشوه الشديد فى إدراك الألوان. إن علماء مشهورين مثل: هرمان فون هلمهولتز Hermann Von Helmholtz، أو إروين شرودنجر Erwin Schrödinger، قد خلعوا أساميهم على قياسات خاصة، وتسمح التعبيرات بتعريف درجات بين لونين، فقط بالتحرك على منحنى بقياس، ويجد هذا المفهوم تطبيقًا فى مختلف قطاعات الصناعة، والطباعة وقطاع السيارات (تجانس الألوان للترتيبات الداخلية) مرورًا بصناعة الصوتيات والمرئيات.

الفراغ المنحنى كلى الحضور

لقد تكاثرت الفرص لاستخدام النماذج الرئيسية فى الثلاثين عامًا الأخيرة أو بتعميمها مما يسمح لنا اليوم أن نقول إننا نجد الفراغات المنحنية تقريبًا فى كل مكان،

مثلاً فى فيزياء الأجسام الصلبة، وبالذات فى دراسة أشباه الموصلات، والدور الذى لعبته العيوب فى صناعة الكريستال، وصلنا لإدخال مفهوم"الكريستال الخشن" يتعلق الموضوع بوجود عيوب فى جوهر الكريستال وباستخدام لغة هندسية: فوجود ذرة زائدة يشوه نسيج الكريستال ويجعله يسلك مثل فراغ ذى انحناء موجب، فى حين أن نقصان ذرة يجعله بالعكس يسلك سلوك فراغ منحنى ذا انحناء سالب.لاعتبارات توبولوجية عديدة، يتصل الانحناء بالشكل النهائى للفراغ،

والذى وضعه جاوس، وأوسيان بونيه Ocian Bonnet، وهنرى بوانكاريه Henri Poincaré، تسمح بالربط بين كثافة العيوب، وثوابت عامة فى الكريستال.

واتضح أن الفراغات الملساء إطارًا متصلبًا جدًّا من حيث الأسباب الرياضية وكذلك من حيث أهداف النمذجة، فلنفكر مثلاً فى نماذج مشروطة لأسطح تستخدم بشكل دائم فى الحواسيب، الماكينات التى لا تتداول المعطيات إلا فى الأعداد المنتهية. إن امتداد الهندسة فى هذا الاتجاه تم فى النصف الثانى من القرن العشرين مرتبطة بأسماء ألكسندر دانيلوفيتش Alexander Danilovich وميشا جروموف Misha Gromov. وبالفعل فإن الجزء الأكثر براعة فى هذا العمل يخص المعطيات الأكثر ضعفًا التى نضعها على الهندسة لنهيء لمفهوم الانحناء، ومن المهم أن نلاحظ أنه بالرجوع إلى السيطرة على قياسات المثلثات ما كللت هذه المسيرة فى النهاية بالنجاح، ويمكن اليوم أن نتحدث عن قياس رسم بيانى (رسم بيانى مترى) أى رسم بيانى ضلوعه مزودة بأطوال.

هناك أمثلة مهمة لرسوم بيانية حصلنا عليها من شبكات المعلومات مثل الإنترنت، والتطويل فى هذه الشبكات له علاقة مباشرة بوجود مناطق ذات انحناء موجب، فالتطويل يضمن القوة والصلابة، ويعنى أقل هشاشة فى حالة فقد أى اتصال.

إن دراسة تركيبية نظام ما يمكن أن تتم بربطها بخواص الانحناء، والنظم ذات الانحناء السالب تعرف بسلوكها الإرجوى[٦٦] ergodique، ثم بعد ذلك قدرتها على توليد تعقيد (تركيب) كبير، واحتواؤها على كمية معلومات كبيرة جدًّا (تكبر أسيًا مع عدد المواقع sites)، هذه الأدوات يجب أن تظهر (يتم الإعلان عنها) فى تلاؤم لدراسة المشكلات الموضوعة من قبل كميات ضخمة من المعطيات التى نحصل عليها فى إطار عمليات تتابع الجينوم، ونلمس هنا مجال آخر تكون فيه

---

(٦٦) النظرية الأرجوية Theorie ergodique تختص بدراسة التحويلات المحافظة على القياس وعلى وجه الخصوص دراسة نظريات نهايات الاحتمالات والمتوسطات المتنقلة.

الحاجة للجوء إلى مفاهيم رياضية نحس بها بشكل قوى، والفراغات المنحنية يجب أن تكون فى اللعبة بشكل أو بآخر.

ختام

فى النهاية سمحت لنا هذه الرحلة فى الفراغات المنحنية بتوضيح:

- أن الرياضيات ذات مفاهيم خلاقة (مبدعة) مفهوم الانحناء هنا.
- أن الرياضيات هى مخازن للنماذج (هنا الهندسات).
- أن الرياضيات تولد الأسئلة (سؤال عن استقلال مسلمة التوازى).
- ولكنها أيضًا غارقة فى المجتمع (مثل الأمثلة المذكورة فى النص).

الحلقة الكسورية من الفن إلى الفن عبر الهندسة، والمالية، والعلوم[٦٧]

بقلم: بنواه ماندلبروه

Benoît MANDELBROT

ترجمة: مها قابيل

إن هندسة الكسوريات fractale géométrie ليست قديمة بما إنني لم تحدوني الفكرة سوى قبل عام ١٩٧٥ ببضعة أعوام ويمتد مجالها وتمحى المقاومات التى تواجهها، ونجد أن الفكرة التحتية تأتى تلقائيًا إلى بنى البشر، وأن الحدس الكسورى يعد جزءًا من تراث البشرية فى أفريقيا وأسيا مثله فى أوروبا، وعندما تلوح لنا فكرة تبدو بلا قيمة قد نفكر فى السحرة والجنيات، وتفيض فجأة بنتائج عديدة متنوعة ومهمة، ولعمل مقدمة للكسوريات وبالتالى فهمها، فلنسأل أنفسنا إن كان عنصرًا هندسيًا يستطيع أن يأخذ الشكل نفسه سواء اختبرناه عن قرب أو عن بعد، وقد سميت هذه الخاصية مؤخرًا التشابه - الذاتى، وهى تبدو شديدة التفاهة، ولكنها بذرة ازدهار تطورات هندسة كاملة، والتفاهة أو البساطة هو المصطلح المخصص لوصف المستقيم والمستوى المثاليين، واللذين هما مثالين لتشابه- ذاتى يعرفه الجميع، فى المقابل فإن الكرة لا تبدو متشابهة ذاتيًا، عندما نشاهدها عن قرب، نحبط، إنها تبدو مسطحة، وتبدو من بعيد دقيقة، مثل أى شىء حاد.

منذ مائة عام وفى الفترة من عام ١٨٧٥ وحتى عام ١٩٢٥ بدأ الرياضيون ناقذو البصر إدراك بعض الطرف (الأمور الغريبة) أو الأشياء شاذة الخلقة والتى قدموها على أنها جديدة، وليس لها مثيل فى الطبيعة وتناقض الحدس الهندسى

---

(٦٧)نص المحاضرة رقم ١٨٠ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٨ يونيو ٢٠٠٠.

بعض هذه الأشياء كانت متشابهة ذاتيًا؛ لأن هذه الصفة تجعلهم أسهل فى الوصف، وسأعمل فى مرحلة لاحقة على فصلهم عن الطرف والنوادر الأخرى محل النقاش، وسأنذر حياتى العلمية على دراستهم وسأسميهم الكسوريات، ونرى مثالاً فى الجزء الهندسى من الرسم المصاحب لهذا النص، وهذا التقرير سيرسم بخطوط عريضة كل من الثلاث خطوات الحالية لدراسة الكسوريات.

فى المقام الأول هناك مفاجأة مطلقة، وأكبر سعادة فكرية لى فى حياتى، لقد عرفت لهذه الخلقات الشاذة دورًا جديدًا، ولقد تم توصيفهم تهورًا بالاستثنائيين وسأظهر على العكس أن الكسورية ليست بعيدة عن أن تكون القاعدة فى الطبيعة. حسب الحالة فإنها لا تتعلق سوى بالتفاصيل أو تمس الجوهر.

إن هذا بحث جرىء ويثير الشك، فيجب تحديده وجعله "طبيعيًا"، والنقطة الرئيسية تكمن فى أن المستقيم والمستوى يبدوان أملسين تمامًا، ولكن القاعدة شبه العامة أن الأشياء بعيدة عن هذه المثالية: فلا تكون ملساء ولكن خشنة كتفاصيل أو كجوهر.

ولنفكر الآن فى مجموعة الرسائل التى تصلنا من الحواس، فرسائل حاستى النظر والسمع، ولنعتبرها مرهفة وجد أنها الأسرع وهى الأفضل فى الاكتشاف؛ حيث إنها الأسهل فى الاكتشاف، ومن جهة أخرى فإن حاسة الإحساس بالناعم والخشن تبقى خارج العلوم، وتنتمى لعالم الميكانيكا العملية للاحتكاكات التى يبحث المهندسون التخلص منها، ويبدو من المستحيل اقتلاع مثل هذا المفهوم. إن الأسئلة التى طرحتها الخشونة ليست بلهاء ولكنها غير مطروقة، المتاحة لعدم توفر الأفضل، فهى لا تحصل سوى على إجابات غامضة غير وافية بالغرض.

لنفكر مثلاً فى أسئلة لا يمكن الإحاطة بها، ها هى:

- كيف نقيس خشونة أو لطافة تقارير البورصة، ليس إلا لكى نتمكن من تقدير الخسائر المالية بشكل واقعى؟
- كيف نقيس سواحل بريطانيا؟

- كيف نصف شكل الساحل أو النهر، أو خط انقسام المـــاء، أو حـــدود حـــوض الجذب فى النظام الهيدروليكى ولكن أيضًا للأنظمة الديناميكية؟
- كيف نعرف سرعة الهواء أثناء الإعصار؟
- كيف نقيس ونقارن خشونة الأشياء العادية؛ مثل حجر مكسور، منحدر، جبـــل، أو قطعة من حديد صدئ؟
- ما شكل السحابة، الشعلة، أو لحام المعادن؟
- ما كثافة المجرات فى الكون؟
- كيف يتغير النشاط فى شبكة الإنترنت؟

كل هذه الأسئلة أو الأجزاء من الأسئلة، إنها الهندسة الكـــسورية (المكملـــة بعديدة الكسوريات multifractale) هى التى تجيب عليها بأول إجابات مرضـــية. ففى كل حالة تبنى الإجابات على النوعية – التى هى نفسها مفاجأة – فإن الخشونة تبدو دائمًا كسورية، وفى كثير من الظواهر الطبيعية أو تلك التى من صنع البـــشر (مثل البورصة أو الإنترنت) يسمح ذلك للهندسة الكـــسورية بـــأن تـــصبح نقطـــة الانطلاق لأول نظرية للخشونة "البسيطة".

للتلخيص ولطمئنة كل قلق قد تكون سببته الكسوريات، فإن هـــذه الهندســـة الحديثة التى ولدتها من الاتحاد بين رياضة ما خفية، والحاسة الأكبر فى حواســـنا أنها ستستمر وتثمر وتفرض نفسها ولن ينقصها قضية لتعالجها، بالإضافة إلـــى أن مجالها يمتد فى البداية فى المنحدر ثم فى قمة أعمالى العلمية، ففى المنحدر تـــؤدى لاندهاشة ثانية مطلقة، هذه المرة هـــى اندهاشـــة جماليـــة. إن الـــصور الحديثـــة للكسوريات، هى ثمار بلا عدد لما كان يبدو فى الأول زواج غير متكافئ، والولادة تتم فى مركز معلوماتى، أصبحت شيئًا فشيئًا مدركة كأشياء جميلة، أو على الأقـــل شديدة التجميل، وتأتى مجموعة ماندلبروه Mandelbrotعلى بالنا دون أن نقـــصد، وقانون قديم يبدو شديد التفاهة، ينكشف عن أنه مصدر الـــصور الخياليـــة، والتـــى أصبحنا نراها فى كل مكان، لدرجة أنها تتأسس فى الكون المرئى للبشرية. إنها لن

تعانى مصير الصيحات المختلفة نفسه، وحسب التعبير الجميل لصديقى المرحـــوم مارسيل بول شوتزنبرجر Marcel Paul Schutzenberger، إنها تميـــز أســـلوب جديد.

من الآن فصاعدًا سيضاف إلي منحدر الهندسة الكسورية كونه مذهب ما بين العلوم، إن عدم الوضوح يولد مرة أخرى بشكل أقوى، وتلعب الهندسة الكـــسورية العديد من الأدوار فى الوقت نفسه، كيف لا يكون عمرها سوى ٢٥ عامًا فقط؟ وأن الكسوريات الأولى ليست سوى مائة؟

إن انطلاق كل هذه الأشياء وفرصة أن يكون الإنسان هو الشخص المطلوب فى المكان المطلوب والزمان المطلوب، هى هبة رائعة يجب تقبلها بتواضع.. فمنذ كتابى فى عام ١٩٧٥ وخاصة الكتاب الإنجليزى فى عام ١٩٨٢، قد حلقت الهندسة الكسورية كلية بمعنى الكلمة وتلقائيًا، ولكنى لم أزهُ أبدًا بأننى قد اكتشفت كل ذلـــك وأنا العدمى السابق. على العكس تمامًا لقد كنت أبحث عن رواد مثـــل جوســـتاف إيفل (Gustave Eiffel) الذى كان يعجبنى أن أردد جمل له ولكن ليس من ضـــمن هؤلاء الرواد من يمكن إدراكه كمكتشف نهائى. ما الوتر الحـــساس الـــذى كانـــت تنتظر منى البشرية أن أعزف عليه؟

لنحل هذا اللغز الكبير، هناك مفاجأة ثالثة ظهرت ووضعت نفسها فى قمـــة أعمالى، ولقد استحقت أعمالى كثير من القراء فى كل مكان وبريـــد غنـــى ملـــىء بإرشادات منوعة. هذه هى التبعات فى تاريخ الكسوريات فى الفترة من١٨٧٥ إلى ١٩٢٥ تبقى فترة قوية متخصصة وخادعة، ولكن يبدو أننا لا نستطيع تحديد بدايـــة ما أيًا كانت.

ولنحدد أن الكسوريات هى عبارة عن أشكال نعطيها بغـــض النظـــر عـــن المعانى التى نعطيها للكلمات التفصيلة، تعيد إنتاج الجزء والجزء يعيد إنتاج الكـــل. للتأكد هناك إجراءات عديدة تبدأ برسم خطوط عريضة لشكل، ثم اســـتخدام مولـــد لإضافة تفاصيل أصغر فأصغر، ومن الضرورى إذن أن يكون لدينا تقدم بلا نهاية،

فكرة مألوفة لعلماء اللاهوت. فى البوذية، نجد الموضوع (الذى أعاد تناوله لايبنز Leibniz) عن قطرة الندى التى تحتوى فى داخلها على نسخة مصغرة ومكررة من العالم، بداخلها قطرات ندى وهكذا. هذا الفكر الدينى لقطرة الندى يجد صدى فى العديد من بماندالاة[٦٨] Mandalas التبت؛ حيث نجد بوذا بكل المقاسات، ونجدها أيضًا فى **الموجة الكبيرة** للرسام هوكوساى Hokusai.

لنغير القارة والمهنة، إن موضوع المولد المتكرر موجود عند العالم كانط (مصنوع من مجموعات من المجرات مجتمعة لتكون ركام، وركام فائق وهكذا بلا نهاية) فى الرسومات الشهيرة **لينابيع المياه** لليوناردو دافينشى، بدواماتها المتداخلة، وفى **الملاك** لجوستاف دوريه Gustave Doré المكون من ملائكة أصغر منه، دون الحديث عن **وجه الموت** لسالفادور دالى Salvador Dali.

لنغير مرة أخرى القارة؛ حيث علمنا مؤخرًا أن الفن فى دول أفريقية عديدة يفيض بالكسوريات، بدقة ذات دلالات حيث إنها مادة هدفها التعبير عن تقاليدهم.

ولنعبر إلى كتابات الرسامين، ما أجمل هذه الكلمات لأوجين دى لا كرواه Eugene De La Croix: يدعى سويدنبورج Swedenborg فى نظريته عن الطبيعة أن الرئة مكونة من عدد من الرئات الأصغر حجمًا والكبد من الأكباد الصغيرة والطحال كذلك يتكون من عدد من الطحالات الصغيرة... إلخ.

"دون أن أكون ملاحظًا قويًا قد أدركت هذه الحقيقة منذ وقت طويل، لقد كنت أقول دائمًا أن فروع الأشجار هى نفسها أشجار كاملة صغيرة، وأجزاء الصخور تشبه كتلة من الصخر وجزيئات الصغيرة من التربة تشبه الركام الكبير للتربة، ولقد أدركت أننا قد نجد هذه التناظرات بكم كبير، وإن الريشة مكونة من مليون ريشة صغيرة".

---

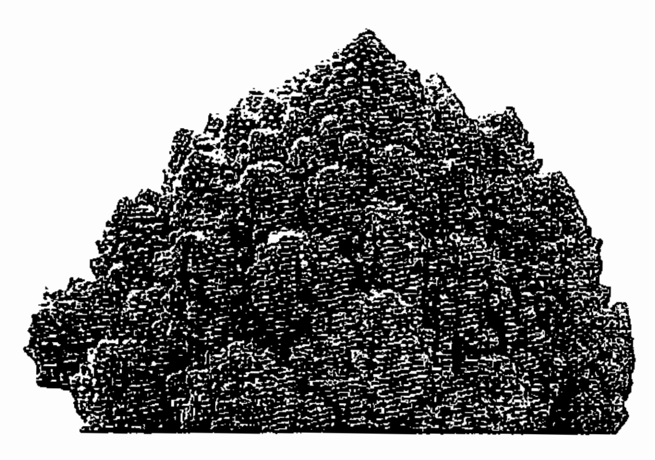
(٦٨)تعنى كلمة ماندالاة دائرة مقدسة تعكس البناء المركزى للكون وتحتوى تمثيل للديانات البوذية. وهو عبارة عن رسم تخطيطى خاص بالكون cosmiques مرسوم على نسيج أو مكون فى الرمل الملون، ويستخدم فى التأمل الروحانى.

لنتوقف عند سويدنبورج، والذى سيتلو كلماتها إمرسون Emerson إنه ليس لامعًا فى علم الأحياء ولكن لديه حدس أن العالم مكون من ملاحظات حقيقية، وكذلك قد يكون اندهاش ديلاكرواه De La Croix أقل إذا كان قد اختار القنبيط. ليس للموضوع قيمة علمية ولكن: فى حين أن رأيه الخاطئ يستحق أن يقال؛ لأنه يلفت النظر إلى حقيقة جلية: إن فكرة التعليب المتشابهة ذاتيًا تأتى عفويًا للبشر والحدس بالكسورية كان دائمًا جزءًا من تراث البشرية فى أفريقيا أو آسيا أو أيضًا أوروبا.

إن كائنًا ذا قائمتين، بدون ريش لم يصبح آدميًا إلا بعد أن أخضع النار وعرف التوابل وزين جسمه وبيته ومعبده، وعبر آلاف السنين أصبحت نماذج الزينة أكثر رقيًا، وبعضها – مثل الهياكل والمشابك والأعقاد – ساعدت فى ميلاد هندسة سيقننها إقليدس Euclide فيما بعد وبعد ذلك بكثير تصبح أداة أساسية لعلوم المتعددة، وبعض عناصر الزينة الأخرى ستترك جانبًا ثم تتقنع (تضع قناعًا) لتشارك فى ثورة ضد – إقليدية فى الرياضيات، وتعطى فى النهاية شكلاً للأشياء كانت الهندسة القديمة والعلوم ملزمين بتركه جانبًا كـ"عديم الشكل"، بمعنى أنه بلا أى شكل يسمح بتحليل طبيعته وتركيبه.

لقد قطعنا مساحات من المعرفة النزيهة والعملية ذات أطراف متجهة للفن؛ قمة ومنحدر لأعمال حية آخذين فى الانغلاق أمام أعيننا فى شكل حلقة كسورية، وسافرت هذه الحلقة منذ فترة بعيدة بدءًا من الفن، فى رحلة طويلة وغامضة ومشوشة ومن الآن فصاعدًا عادت لأصلها، و

إن لم يكن هناك فى الطبيعة قنبيط كصنف خيالى، لكان اخترعه أحد الكسوريين (المهتمين بالكسوريات)، وأفضل توضيح لمفهوم السطح الخشن ولكن الغنى بالتباينات من ضمن المواد التى نستخدمها كل اليوم (شكل ١)



الشكل (١)

القنبيطة ومفهوم التشابه الذاتى

إن القنبيط الذى نحصده كاملاً مكون من زهرات كل منها تعتبر قنبيطة صغيرة مقسمة لقنبيطات أصغر وهكذا، ونستطيع تتبعها بالعين المجردة ثم بالعدسة ثم بالميكروسكوب، هكذا. المفهوم الموضح بالرسم هو تباين يسمى تشابه- ذاتى، وهو تعميم تتصف به الكسوريات. إن البروكلى يساعد أيضًا، فنستطيع أن نتخيل أن هذا المفهوم ضمنيًا يعود لعهد قديم، ولم يتم استنباطه إلا مؤخرًا، وبالتالى اكتشاف نتائجه، وإن القيمة الغذائية للقنبيط تقاس بوزنه أو بحجمه ولكن بكم يقاس سطحه؟ يذكرنا هذا بسؤال قديم: "ما طول ساحل بريطانيا؟" مع درجة إضافية.

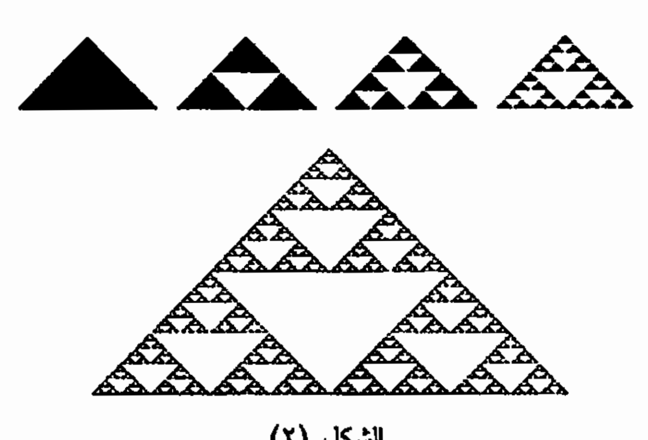
إن تفرعات الساق تحتفظ بمساحة للمقطع العرضى ولكن إذا بدأنا من الجذر فصاعدًا فإن المدعو مقطع يتشعب إلى عُقد تأخذ فى التكاثر والصغر، إذن محيط القطع لا يتوقف عن النمو وكذلك المحيط الكلى للسوق لا يتوقف عن الزيادة، وعندما نقترب من قمته نظريًا يصبح لا نهائى، وعمليًا يتوقف على دقة التحليل.

موضوع كسورى آخر: إذا كان القنبيط يعتبر مدمجًا فى نفسه ولا يترك مكانًا للمطر أن يمر بين زهراته، يمكن أن نميز فى قمة سطحه الكلى الجزء الذى يسقط عليه المطر، ومساحة هذا الجزء الأخير لانهائية هى الأخرى (ولكن حسب

ما قاله لجورج أورويل George Orwell) ولكنها أقل من المساحة الكلية.

عندما كنت طالبًا، كان الرياضيون يدرسون لنا أن الأسطح ذات المساحات اللانهائية هى من اختراعهم ويبدو أن المستويات والكرات هى التى تم اختراعها من قبل فنانين من كل الأشكال والألوان، والطبيعة نفسها تقدم لنا القليل من الكور والكثير من الأشياء الخشنة متضمنة أشكال شبيهة بالشجرة: مثل الأشجار، أو ما بداخل الرئة، ما بداخل الكلى أو الكبد. لا يوجد ما يفاجئنا فى كل ذلك إن هذه الأشياء ذات الشكل الشجرى تنتج من التبرعم المتتالى والتشابه- الذاتى المقترح من قبل الطبيعة اقتصاد فى الوسائل الواضحة ولكنها... "طبيعية ".

لا يوجد أى علاقة بين الكسوريات والعرائس الروسية التى تدخل فى بعضها البعض داخل الأم بحيث إن كل منها تحتوى على واحدة أصغر. الأكثر صغرًا تكون كسورية تبعًا لما تسمح به المهارة والأمان الذى يوفره لها صاحبها، وإذا كانت المادة مستمرة لكان من الممكن أن نتخيل وجود عرائس تتقارب عن طريق التقريب المتتالى نحو نقطة معزولة. يحب الرياضيون أن يفكروا فى نقطة مثل نهاية المجالات المعلبة الآخذة فى الصغر، ولا تأتى العرائس الروسية بجديد بالنسبة للمفهوم الموجود بشكل ٢.



الشكل (٢)

عرائس منشورية وكسورية متشعبة

كى نصل إلى الكسوريات، نفترض أن كل عروسة تحتوى على ثلاثة، للتبسيط، نعطيهم شكل المنشور، ذو الارتفاع الثابت وقواعده هى مثلثات متساوية الأضلاع. قاعدة العروسة الكبيرة هى المخطط المرسوم على اليسار وسنضع بداخلها ثلاث عرائس، كل واحدة أصغر مرتين، مثل المخطط الثاني... ولنسميه H بأعلى، G (فى اليسار)، وD (فى اليمين) ثم نبدأ مرة أخرى لنحصل على ٩ ثم ٢٧ عروسة وهكذا. تعرف متواليتين مختلفتين طولهما ٥، مكتوبتين بالحروف H,G,D عرائس مختلفة من الرتبة ٥. أى خطاب لا نهائى الطول مكون من الحروف H,G,D ويعرف عروسة خيطية الشكل، وفى النهاية تؤسس قواعد هذه العرائس فى منحنى ذى عدد لا نهائى من الانعطافات، المتشابهة - ذاتيًا، إذن كسورية. هذا المنحنى له قصة طويلة فى التزيين ولكنى وجدت أنه من المسلى أن نسميه "سجادة سيربنسكى Sierpinsky". لقد كانت هذه الفكرة مألوفة لدى سلفادور دالى Salvador Dali، الذى نعرف له اللوحة المشهورة وجه الموت.

إن رسمًا أقل مرحًا لا يضم ثلاث ولكن أربع عرائس منشورية الشكل: تمتلئ العروسة الأصلية عن آخرها. مع العروستين D،G فقط ستتقلص النهاية عند الجانب الأسفل من العروسة الكبيرة، ويمكن إذن أن نعتبر السجادة خرافة فيما بين النقطة (البعد ١) والمثلث (البعد ٢). لدينا أسباب قوية لنقول إن الحجم الكسورى للسجادة هو ١,٥٨٤٩؛ إنها النسبة اللوغاريتمية بين ٣ (عدد العرائس) و٢ (نسبة تقليص العروسة إلى مركباتها).

إن السكير الذى فقد مفتاحه ويذهب فى مغامرة للبحث عنه (شكل٣) دون أن يتذكر أبدًا من أين أتى يتجول ثم بمعجزة يجده، والطريق الذى سار فيه يمثل برسم (أشبه بخربشة) والتى هى على علاتها لم تعطِ أى شيء مفيد لأى شخص، ولنتمكن من اختبار هذا التكوين فعليًا لقد وضعت النقط التى سار حولها دون أن يعبرها ولونتها باللون الرمادى. بهذا الدعم تحول الرسم فجأة إلى جزيرة تكون سواحلها خشنة فى الصغير كما فى الصغير جدًا إذن كسورية، ومن جهة أخرى إنها أسهل

طريقة لبناء مثل هذا الساحل. وجدير بالذكر أن سواحل الجزر الجغرافية هى أيضًا كسورية (شكل ٣). لقد تعودت أن أختبرهم وأقدر بعينى الأبعاد الكسورية التى تقيس الخشونة، ولقد فكرت أيضًا فى الحجم 4/3. ثم تأكدت منه عدديًا واستنبطه كتخمين رياضى، وبعد عشرين عامًا توجت جهود بطولية، من ضمنها جهود ب.دو بلنتييه B.Duplantier، وأتى البرهان علـــى يـــد و.فرنـــر W.Werner، و أو. شـــرام O.Schram، و جى. و. لاولر G.W.Lawler. هل ستعود العين إلى دورها القديم فى محاكاة الرياضة المدعوة بالبحتة؟

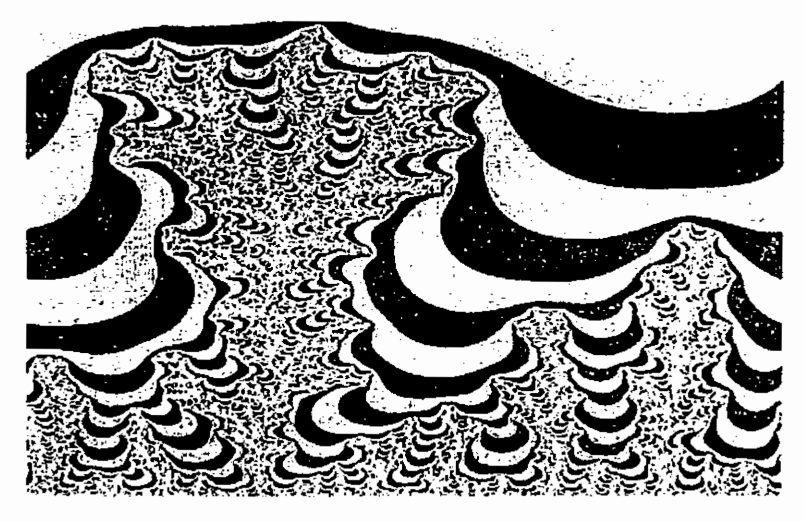


شكل (٣)

الركام البراونى أو جزيرة السكير

لنتخيل أن هناك خلايا من الشعب تحاول أن تتمسك بشعبة مستقرة أصـــلاً، ولكنها تتحول بحيث إن تقوم بجولة السكير، ومن هنا تأتى معالجة فيزيائية لمشكلة ترسب الكربون فى موتورات الديزل والتى طرحت علـــى ل. ســـاندر L.Sander، وت. ويتن T.Witten. المفاجأة تكمن فى أن أثناء طرح هذه المشكلة فى الحاســـب ظهر العطل، وقد كان ذو تعقيد خيالى. مرة أخرى البسيط جدًا يولد المركب جـــدًا. لقد علمت هذه الزوائد الشجرية dendrite المسماة ADL الكثير للعلوم، بتوحيـــدها لعدد لا نهائى من التشكيلات المختلفة (شكل ٤)، ولكن لم تنجح جهود الرياضـــيين

والفيزيائيين فى السيطرة عليها، والتخمينات الكبيرة لا تتوقف عن التحسن مع تقدم العمر.



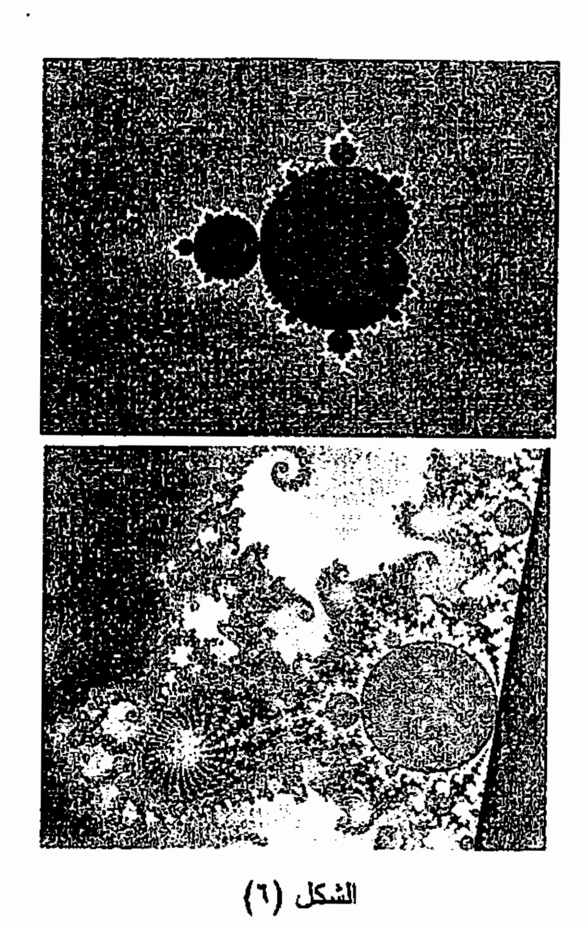
شكل (٤)

الشعب المرجانية الكسورية للـ ADL

إن الرجل الذى هزم جبل Le Cemin Mont واسمه إدوارد ويمبر Edward Whymper، قد لاحظ أن أجزاء من الصخر تشبه للتكوين الذى انتزعت منه، القوى نفسها تعطى شكلها للجزء وللكل، وهذه الملحوظة ترجع للعهد القديم قبل أن أتعرف على ويمبر، ولقد عبرت عنها بإضافة بعضنا مما عندى قدر الإمكان، بقانون بسيط جدًا قابل للبرمجة على الحاسب. (الشكل ٥) يعرض ثلاثة نقوش لكسوريات صناعية ترجع إلى ر. ف. فوس R.F.Voss، وهى تأتى من القانون نفسه ولكنها تختلف فى قيمة البارامتر من أعلى إلى أسفل، البعد الكسورى المشهور هو ٢,٨، ٢,٣، ٢,٢. إذن فهى مدركة كخشونات مختلفة، وتبرهن المقارنة أن المدعو بارامتر الذى نجده فى خفايا الرياضيات،هو قياس أولى وجوهرى للخشونة، وقبل الهندسة الكسورية، لم يكن ممكنًا قياس هذا المفهوم الطبيعى جدًا.

إن التأكيد فى العنوان حقيقى عندما نحاول أن ننفذ قائمة بـــالخواص غيـــر المعدودة والمدهشة، ولكن مفهوم التركيب لم ينجح أحد فعلاً فى قياســـه، والمفتـــاح الذى يوصلنا لمجموعة ماندلبروه، هو بالعكس تمامًا ذو بساطة صـــارمة. خطـــوة واحدة توصلنا من التافه إلى الخيالى. فى القانون المفتاح، المادة الفعالة (كما يقـــول الأطباء) هو القانون الصغير z*z +c. للذين يعانون من فوبيا الأرقام، إن ما يهـــم هو إيجازه، ولكن كل المبرمجين اليوم يعرفون معنى كلمـــة iteration أو تكـــرار بدءًا من c = 0. إذا بدأنا من عدد مركب وليكن نقطة c (إننـــا لا نخـــسر شـــيئًا إذا أخذنا c فى دائرة نصف قطرها ٢ حول نقطة الأصل) ونكون c، ثم c c+ ×c، ثـــم c+(c*c+c) (c*c+c)... إلخ.

بعد حوالى ألف تكرار، نتأكد من أننا لم نخرج من دائرة لنقل نصف قطرها ١٠ إذا كان هذا هو الحال فإننا استقرينا على أن c تقع فى مجموعـــة مانـــدلبروه (شكل 7)



الشكل (٦)

هل ستكون مجموعة ماندلبروه المادة الرياضية الأكثر تعقيدًا على الإطلاق؟

لقد أجريتُ هذه المجموعة على الحاسب فى عام ١٩٧٩ إلى عام ١٩٨٠ لأختبرها بكل الشغف والتركيز الذى كانت تسمح به الأدوات البدائية لذلك العصر، ولاحظت حقائق تجريبية مختلفة ترجمتها كحدس (أو تخمين) رياضى، وتم إثبات أحدهم خلال ستة أشهر على يد أ. دوادى A.Douady و ج. هوبارد J.Hubbard الذين أعطوا اسمى لهذه الفئة، وآخرين استغرقوا من خمس إلى عشر سنوات وأصبحت ملاحظتى أول حدس (تخمين) رياضى مشهور. وقد حاول كثيرون تسلقه ولكن لم ينجح أحد.

هناك أشخاص يصل عددهم إلى ملايين أخذوا يكررون الخطـــوات نفـــسها وملئوا صفحات الإنترنت بصور "لمجموعتي". الدهـــشة الأولـــى يتبعهـــا عطـــش لا يقاوم للمعرفة ورؤية المزيد، ثم يأتي الإحساس بالشبع ويحضر انطباعًا فضوليًا بـــ "لقد رأيت ذلك من قبل".

يبدو الأصل التقني لهذه المجموعة من الآن فصاعدًا أقل أهمية من قـــدرتها السحرية على التحديد والعزف على وتر حساس مشترك للبشرية.

المراجع:

- *Les objets fractals : forme, hasard et dimension*, 4[e] édition, Paris, Flammarion (Collection Champs), 1995.
- *Fractales, hasard et finance*, Paris, Flammarion (Collection Champs), 1997.
- *The Fractal Geometry of Nature*, New York, W. H. Freeman and Company, 1982.
- *Fractals and Scaling in Finance, Discontinuity, Concentration, Risk*, New York, Springer, 1997.
- *Multifractals and 1/f Noise, Wild Self-affinity in Physics*, New York, Springer. 1999.
- *Gaussian Self-Affinity and Fractals: Globality, the Earth, 1/f, and R/S*, New York, Springer, 2000.

هندسة غير إبدالية[٦٩]

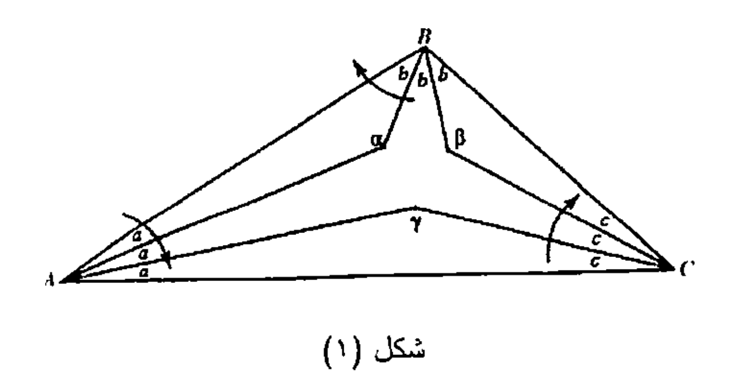
بقلم: آلن كونز

Alain CONNES

ترجمة: مها قابيل

لقد تقدمت مفاهيمنا الهندسية منذ اكتشاف هندسات غير إقليدية، وأدى اكتشاف ميكانيكا الكم ولا إبدالية الإحداثيات فى فراغ الأطوار للنظام الذرى إلى تطور عميق فى المفاهيم الهندسية نحو هندسة حديثة تسمى هندسة غير إبدالية géométrie non-commutative، وهدفى هو إعطاء مقدمة لهذه النظرية دون الدخول فى تفاصيل تقنية، وسأبدأ بالحديث عن الهندسة الإقليدية وعن نظرية شهيرة فى الرياضيات ترجع للرياضى الإنجليزى فرانك مورلى Franck Morley، وفى نهاية القرن التاسع عشر.

إن النص الدقيق للنظرية هو الآتى: بدءًا من مثلث ABC نقسم كل من زواياه إلى ثلاثة أجزاء متساوية، وعند تقاطع القواطع الثلاثية الثلاثة على التوالى نحصل على ثلاث نقاط $\alpha\beta\gamma$. نص نظرية مورلى يكون:



شكل (١)

(٦٩) نص المحاضرة رقم ١٨١ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٩ يونيو ٢٠٠٠.

النظرية ١:

المثلث $\alpha\beta\gamma$ هو مثلث متساوى الأضلاع.

إنها نتيجة بسيطة وجذابة جدًا، ولم يعرفها اليونانيون، ويعتبر نادرًا إيجاد نتائج لم يعرفها اليونانيون عن هندسة المثلث.

إن المثلثABC الذى بدأنا منه اختيارى وليس له أى تماثل، مما يجعل من المدهش أكثر أن نحصل منه على مثلث متساوى الأضلاع بهذا البناء، و

يمكن أن نلاحظ هذه النتيجة الهندسية مباشرة عن طريق المساحات البصرية فى المخ وحتى إذا كنا لا نعرف الإثبات، ونستطيع أن نفهم النص بشكل مباشر بفضل غنى الإدراك البصرى، ونستطيع إعطاء هذه النظرية إثبات هندسى بسيط وهو عبارة عن أن نبدأ بمثلث متساوى الأضلاع $\alpha\beta\gamma$وإعادة بناء مثلث ماABC ولكن يبقى هذا البرهان مصطنع.

والآن سأقدم نظرية ذات طابع مختلف كليًا، فبدلاً من استدعاء المناطق البصرية فى المخ سوف نستدعى المناطق اللغوية، هى نتيجة جبرية، والنص الذى سأتحدث عنه ملائم لأى حقل[٧٠] corps، وإذن نص سهل الإثبات (كلما كان النص عام كان سهل إثباته لأن عدد المعطيات التى يجب استعمالها تكون مقيدة أكثر)، وليكن K حقل وليكن f,g,h ثلاثة عناصر من الزمرة G زمرة[٧١] groupe التحولات النقية للحقل؛ أى أنها تطبيقات منK إلى K على شكل

$$x \rightarrow ax + b$$

---

(٧٠) الحقل هو فئة من الأعداد يمكن جمعها وضربها وفيها كل عنصر غير صفرى له معكوس بحيث تبقى القواعد السائدة فى الحساب صالحة، ونذكر الأعداد النسبية ولكن هناك أمثلة أخرى لحقل مثل حقل مكون من عددين، وحقل الأعداد المركبة.

(٧١) إن الحديث عن الزمرة هو الحديث عن إنه إذا ركبنا تحويلتين نحصل على الثالثة، وتركيب التحويلات يمكن الحصول عليه بحساب حاصل ضرب المصفوفات.

النظرية ٢:

المتساويتان الآتيتان متكافئتان.

$$1)\ f^3 g^3 h^3 = 1$$

$$2)\ J^3 = 1\ ,\ \alpha + j\beta + j^2\gamma = 0$$

ندون j كتابت "a" مناظر لـــ fgh و α, β, γ هي النقط الثابتة لـــ fg, gh, hf. (يجب أن نفترض أن fgh, fg, gh, hf ليست انتقالات).

إذا ما قارنا النظريتين بأعلى، النص الهندســي لنظريـــة مـــورلى والـــنص الجبرى للنظرية الثانية، ما يفاجئنا هو أن النظرية الثانية أسهل كثيرًا فى إثباتها من الأولى. بالفعل يكفى حساب بسيط للتأكد من تكافؤ (٢ ، ١) من النظرية ٢. يمكــن أن نعطى النظرية ٢ إلى طالب فى السنة النهائية كى يثبتها، والذى يجب أن يكون قادرًا على عمل الإثبات؛ لأنه يحتاج لتحقق بسيط، ولدينا من جهة نتيجة هندســية بسيطة فى ضبطها، ومن جهة أخرى لدينا نتيجة جبرية تذكرنا بالتداولات الأولية. إن السبب الذى من أجله أردت تجميع نتيجتين ذات طبيعتــين مختلفتــين هــو أولاً لأوضح جيدًا هذه الثنائية بين طريقتين فى العمــل بالنــسبة للرياضـــى، الطريقـــة الهندسية والطريقة الجبرية، وبالفعل فإن النظرية ٢ تستلزم مباشرة نظرية مـــورلى وتعطيها برهانًا مجردًا فى الاتجاه الذى تسير فيه هذه الأخيرة فـــى إطـــار أكثـــر عمومية من الهندسة الإقليدية.

لفهم الاستلزام "النظرية ٢ تستلزم النظرية ١" يكفى أن نأخذ حقــل الأعــداد المركبة ونضم للمثلث ABC ثلاثة دورانات f, g, h حول الثلاثـــة رؤوس للمثلـــث والتى زواياها هى ثلثى الزوايا برأس المثلث. نتيجة مباشرة (شكل ١) إن حاصـــل ضرب المكعبات f3, g3, h3 يساوى ١؛ لأن f3 مثلاً هو حاصل تركيب تمـــاثلين بالنسبة لجانبى الزاوية فى A وهذه التماثلات يتم اختصارها اثنين اثنين، وينتج إذن من نظرية ٢ أن

$$\alpha + j\beta + j^2\gamma = 0$$

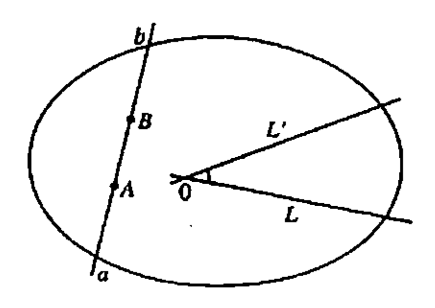
حيث α,β,γ نقط ثابتة من hf, gh , fg. ولكن من الواضح أن α,β,γ هى رؤوس المثلث الصغير لمورلى وأن هذا المثلث متساوى الأضلاع لأن الشرط

$$\alpha + j\beta + j^2\gamma = 0$$

هو صفة معروفة للمثلث متساوى الأضلاع.

إنه بالتحديد عملية الترجمة تلك بين المساحات الهندسية من جانب، ومساحات اللغة أى الجبر من جانب آخر هى أساس كل ما سأقوم بشرحه.

لننتقل الآن إلى الهندسة غير الإقليدية، وهناك نموذج للهندسة غير الإقليدية يرجع لـ *كلاين Klein* وهو بسيط جدًا (الشكل ٢). فى هذا النموذج نجد أن نقط الهندسة هى نقط المستوى التى بداخل قطع ناقص. ونستبعد كل النقط خارجه، والمستقيمات هى تقاطع المستقيمات العادية داخل القطع الناقص، والآن من البديهى فى هذا النموذج أن المسلمة الخامسة لإقليدس غير صالحة. وبالفعل فمن نقطة خارج المستقيم (ولتكن o فى الشكل) يمكن رسم عدة مستقيمات موازية لمستقيم معين (المستقيم AB من الشكل). من الواضح أن تحديد النقط والمستقيمات لا يكفى لتعيين الهندسة، ويلزم لذلك تعيين التطابق بين القطعتين المستقيمتين $\overline{AB}$, $\overline{CD}$، أو ببساطة أكثر تعيين طول القطعة AB. بالمصادفة فى نموذج *كلاين*، هذا الطول معطى باللوغاريتم ثنائى التوافق bi – rapport للنقاط الأربع A, B, a, b؛ حيث a, b هى نقط تقاطع المستقيم AB مع القطع الناقص، ونعين بشكل مشابه الزوايا بين المستقيمين L,L'.



شكل (٢)

إن كل مسلمات إقليدس Euclide متحققة بهذه الهندسة ما عدا المسلمة الخامسة الخاصة بالموازى الوحيد لمستقيم معطى يمر بنقطة معطاة، وفى البداية عندما اكتشف **جاوس** Gauss ذلك، لم ينشره، ربما كان يفكر أنه مثال مغاير خفى عن أن يكون موضوعًا رياضيًا مهمًا؛ حيث إنه يخص موضوعًا ذا غنى كبير وخصوبة، الذى ساق الرياضيين للخروج من الإطار التقليدى للهندسة الاقليدية. هذه الهندسة الحديثة ولدت اتجاهين مجردين. الاتجاه الأول مبنى على التماثلات والزمرل **Lie** المشكلة فى برنامج إرلانجن لفلكس كلاين Programme d'Erlangen de Félix Klein وتسند جمال الهندسة غير الإقليدية إلى وجود زمرة تماثلات تسمح بتحريك اختيارى للشكل الصلب، وبالمصادفة فإن فى نموذج **كلاين** هذه الزمرة هى زمرة التحويلات الإسقاطية transformations projectives للمستوى والتى تحفظ القطع الناقص.

بالفعل لقد اقترح ريمان Riemann وجهة نظر مختلفة كليا، ولقد تمسك بالبحث فى فراغات أكثر عمومية، تكون فيها حركات الجسم الصلب ليست بالضرورة ممكنة. عمومًا، لنأخذ مثالاً هندسة ريمان فإننا لا نستطيع تحريك مثلث دون تشويه الأطوال والزوايا. **الفكرة الأولى** لريمان هى أهمية فهم ما الفراغ،

بمعنى أكثر اتساعًا عما كان مستخدم، والذى ولد مفهوم المتنوع التفاضلى والذى يسمح بنمذجة مفهوم الكميات المتغيرة متعددة الأبعاد.الأمثلة الأكثر بساطة هى فراغ البارامتر لنظام ميكانيكى، أو فئة الألوان، أو فراغ أوضاع جسم صلب... إلخ. **الفكرة الثانية** لريمان هى تعريف قياس الأطوال بدءًا من عنصر الطول اللامتناهى الصغر، والذى يمكن نقله هو من نقطة إلى أخرى، وهنا العنصر الطولى ds عندما نعبر عنه بإحداثيات محلية يسمح بتعبير بالشكل:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} \ dx^{\mu} \ dx^{\nu}$$

إن إحدى الانتصارات الكبرى لوجهة نظر ريمان على وجهة نظر ***كلاين*** يرجع للمرونة الضخمة لاختيار $g^{\mu\nu}$ إنه الدور الذى تلعبه فى النسبية العامة لأينشتاين نستطيع أن نفهم بسهولة لماذا أدخلت المرونة بفضل اختيار $g^{\mu\nu}$ (مما يجعل تحرك جسم صلب غير ممكن) يسمح باتصال مباشر مع قوانين الطبيعة، ففى الحقيقة إن ضمن مفاهيم الهندسة الإقليدية التى تتواءم بسهولة مع حالة ريمان، الأكثر بساطة هو المستقيم، ونظير المستقيم فى هندسة ريمان يسمى جيودسيك ويحدد بمعادلة تفاضلية من الدرجة الثانية:

$$d^2x^{\upsilon}/dt^2 = -1/2\ g^{ua}\ (g_{av,\rho} + g_{a\rho,v} - g_{v\rho,a})\ dx^{\gamma}/dt \ \ dx^{\rho}/dt$$

وهو أحد محركات النسبية العامة؛ سابقًا على اكتشاف معادلات أينشتاين، هو التطابق بين معادلات الجيودسك ومعادلات نيوتن لسقوط الأجسام التى لها جهد V، كذلك إذا كان فى قياس الزمكان l' espace-temps ***لمينكوفسكى*** ***Minkowski*** التى نمذجت النسبية الخاصة، ونستبدل معامل الزمن dt^2 بإضافة الجهد النيوتنى إليه ستصبح معادلة الجيودسك بمعجزة هى معادلة نيوتن، وكذلك بإدخال الطريقة التى يمر بها الزمن وليس قياس الأطوال، ونستطيع نمذجة سقوط الأجسام عن طريق "مستقيمات" الزمكان، واختصار (فى الوقت نفسه) مبدأ التكافؤ والخصوبة التى لا تصدق لتعميم الهندسة التى حصلنا عليها من ريمان، وهذا الدور الرئيسى لنظرية ريمان فى تطور النسبية العامة يجعل من $g_{\mu\nu}$ الخبز اليومى

للفيزيائيين المتخصصين فى النسبية العامة، مما يذكرني بنكتة عن الفيزيائى *ريتشارد فينمان* ***Richard Feynman***:

لقد دعى إلى مؤتمر عن النسبية العامة فى شيكاغو، وعند وصوله إلى المطار فى اليوم نفسه الذى يعرض فيه بحثه، أدرك مثل كثير من الشاردين أنه نسى الأوراق التى تشير إلى مكان المؤتمر، وطلب من سائق سيارة أجرة أن يقوده إلى الجامعة لكن السائق شرح له أن هناك عدة جامعات. قال له "الأكثر قربًا" وعندما قال له السائق إن هناك جامعتين بعيدتين جدًا عن المطار وكل منهما فى اتجاه عكس الأخرى! فجاءته الفكرة التالية؛ إنه يعلم أن هناك آخرين سيصلون فى اليوم نفسه، فسيطوف بطابور من سيارات الأجرة ليسأل كل من السائقين إذا كان قد وصل أناس لم يتوقفوا عن قول "جى ميونيو، جى ميونيو، جى ميونيو" لقد وجد فى النهاية من يجيبه على سؤاله! وطلب منه أن يقوده للمكان نفسه.

ولنعد لأشياء جادة، فمن الملائم ذكر نص ريمان Riemann بوضوح لكى نفهم إلى أى مدى قد كان هذا الأخير على وعى فى الوقت نفسه بالصلة ما بين المفاهيم التى يطورها والفيزياء، وكذلك الحدود الطبيعية التى كانت تستلزمها المعارف الفيزيائية فى عصره عن صلاحية وجهة نظره.

لقد قال ريمان فى كتابه «*فرضيات تخدم فى تأسيس الهندسة*»:

Hypothèses qui servent de fondements à la géométrie :

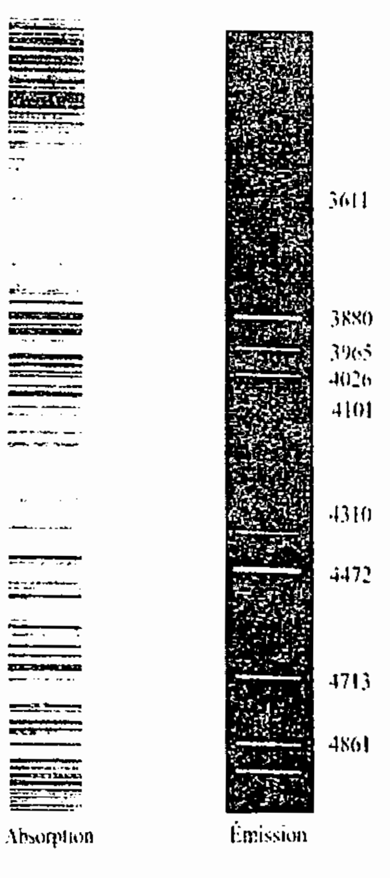
"إن مسألة صلاحية فروض الهندسة فى المتناهى الصغر، مرتبطة بمسألة مبدأ وثيق الصلة بنسب مترية فى الفراغ، ففى هذه المسألة الأخيرة، التى يمكن النظر إليها على أنها منتمية لمذهب الفراغ، نجد تطبيق الملحوظة السابقة، وهو أن مبدأ النسب المترية فى متنوع variété منفصل متضمن فى مفهوم هذا المتنوع، فى حين أن فى المتنوع المستمر، وهذا المبدأ يجب أن يأتى من جهة أخرى. فيجب إذن إما أن تكون الحقيقة المبنى عليها الفراغ متنوع منفصل، أو أن نبحث عن

أساسات النسب المترية rapport métrique خارج هذا الفراغ، ففى قوى التـــرابط التى تؤثر فيه.

"الإجابة عن هذه الأسئلة لا يمكن الحـــصول عليهـــا إلا إذا بـــدأنا بمفهـــوم الظواهر، الذى تم التحقق منه بالتجربة حتى هنا، والذى أخذه نيوتن كقاعدة، وننقل لهذا المفهوم التعديلات المتتابعة، التى اقتضتها حقائق لا تستطيع هذه الظـــواهر أن تفسرها.إن أبحاثًا منطلقة من مفاهيم عامة، مثل الدراسة التى نقوم بها،لا يمكـــن أن يكون لها فائدة أخرى سوى منع هذا العمل من أن يعوق بوجهات نظر ضيقة، وأن التقدم فى معرفة الاعتمادية المتبادلة للأشياء لا يجد عائقًا فـــى الأحكـــام المـــسبقة التقليدية، "ويقودنا ذلك إلى مجال علم لأخر، هو علم الفيزياء، الهدف الـــذى يربـــو إليه هذا العمل لا يسمح لنا بالدخول فيه اليوم".

قطعًا ريمان لم يكن يستطيع توقع أكثر من هيلبرت، فى قائمته الشهيرة ذات الـــ ٢٣ مسألة، الاكتشاف الآخر العظيم للفيزياء فى القرن العشرين وهو ميكانيكـــا الكم. كما سنرى الآن، هذا الاكتشاف يوضح جليًا حدود مفهـــوم المتنـــوع الـــذى اقترحه ريمان.

فلنتفحص الضوء الآتى من نجمة بعيدة ولنجعله يخترق منـــشور زجـــاجى، نحصل بذلك على عدد من الأشعة نسميها أشعة الطيف، وهناك نوعان من الأشعة، تلك التى ترجع إلى ظواهر الامتصاص والأخرى أشعة انبعاث (شكل ٣)، وتمثـــل أطياف الانبعاث للعناصر البسيطة من جدول مندلييف Mendeleïev، توقيع حقيقى لهذه العناصر، وكذلك التوقيع (البصمة) لجسم بسيط هو فئة من الأعداد الحقيقيـــة، والتى تسمى طيف الترددات الخاص بهذا الجسم والتى تسمح بالتحقق من وجـــوده فى أى مركب، ويسمح هذا الطيف S ببناء مميز والذى تم اكتشافه تجريبيًـــا، إنـــه فعلاً فئة من الفروق a-b، حيث a،b عناصر من فئة أبسط هى X، مكونـــة هـــى الأخرى من أعداد حقيقية، ويسمى ذلك المبدأ التجريبى "مبـــدأ التركيـــب ريتـــز – ريدبرج" Ritz-Rydberg، والذى لا يتوقف على درجة الدقة التـــى أجريـــت بهـــا التجارب: عندما أعدنا التجارب بشكل أكثر دقة، هذا المبدأ نفسه استمر فى التحقق.



شكل (٣)

بدءًا من هذه الحقيقة التجريبية، أخذ هايزنبرج Heisenberg فـــى التفكيـــر على مستوى أكبر بالشكل الآتى، وإذا بدأنا من الميكانيكـــا الكلاســـيكية كنمـــوذج للفيزياء المجهرية فإن النظام الذى تمثله الذرة نفسه هو نظام ميكانيكى، من حيـــث هو كذلك، فإنه يتبع القوانين العادية للميكانيكا، ونستطيع نمذجته كفـــراغ الأطـــوار وفراغ هاملتونى hamiltonien، وهـــو فـــراغ رمـــزى symplectique والفـــراغ الهاملتونى هو دالة على هذا الفراغ تسمى "الطاقة"، التى تعمل على دوران الكميات تحت الملاحظة بخطاف *بواسون* Poisson.

والآن عندما نعمل على تفاعل هذا النظام البسيط مـــع الكهرومغناطيـــسية، يجب أن نستخدم نظرية ماكسويل Maxwell التى تسمح بحساب الإشعاع المنبعـــث من هذا النظام. هذا الإشعاع نحصل عليه على شكل تطابق موجات مستوية تتوافق مع شيء يمكن ملاحظته والذى يسمى "لحظة ثنائية القطبية"، والتى لها مركباتهـــا X,Y,Z.وعندما نفكك تطورهم فى الزمن إلى ***متسلسلات فورييه***، نحصل علـــى مركبات الموجات المستوية المنبعثة من النظام، و

إذا عملنا حسابات الميكانيكا الكلاسيكية لهذه الموجات، نلاحظ أن التـــرددات المنبعثة لها خاصية مهمة جدًا: إنها ليست مفهرسة كأزواج(α,β) ولكن كزمـــرة إبدالية هى تمامًا الزمرة الثنائية للطوق الذى تدور فيه الزوايـــا المتغيـــرة بدلالـــة الزمن، ووجود هذا الطوق يأتى من تكاملية النظام الميكانيكى، ويستتبع ذلك أنه إذا كان لدينا زوج ما من الترددات الملحوظة، فإن مجموعهما يجب أيـــضًا أن يكـــون ترددًا ملحوظًا، واللتين ستتم فهرستهما بتركيب عناصر الزمرة، وســـنجد بالفعـــل النظام الديناميكى موضع السؤال بأخذ ثنائى زمرة الترددات الملحوظة.

إن جبر الكميات الملحوظة هو جبر الالتفاف convolution (عملية تكامـــل حاصل ضرب دالتين للمتغير نفسه مزاحتين الواحدة بالنـــسبة للأخـــرى) لزمـــرة الترددات الملحوظة، ويسمح الأخير بإيجاد النظام الديناميكى، ويعطينـــا الطيـــف، ولكن أيضًا يسمح بإيجاد التطور فى الزمن، بما أن الطريقة التى تسجل بهـــا هـــذه الزمرة على خط الأعداد الحقيقية تقول لنا كيف يدور النظام بدلالة الـــزمن، وهـــذه النتيجة لشكلية الميكانيكا الكلاسيكية فى تناقض صارخ مع الملاحظات التجريبية!

إن ما نلاحظه بالتجربة هو مبدأ التركيب لريتز ريدبرج الذى يستبدل قانون التركيب للزمرة المتوقعة بالنظرية الكلاسيكية، وهذا النوع من التناقض بين نظرية (فى هذه الحالة الميكانيكا التقليدية فى اقتران مـــع نظريـــة ماكـــسويل) والنتـــائج التجريبية (فى هذه الحالة تلك التى تخص علم الأطياف هل يمكن أن نحلم بأفـــضل من ذلك لتقدم الفيزياء.

ماذا فعل هايزنبرج؟ لقد بدأ ببساطة بما أعطته له التجربة، وفي الحالة التقليدية نستطيع إعادة بناء الجبر من الكميات الفيزيائية الملحوظة (نقول باختصار ملحوظات) للنظام بدءًا من زمرة الترددات، ويكفي التعبير عن الترددات، وحاصل ضرب ملحوظتين هو ملحوظة كمجموع مركباتها لفورييه. ستبدو إذن كدالة في زمرة حاصل الالتفاف لا يهم القانون الدقيق لحاصل الضرب هذا، كل ما يهم، أنه لا يستخدم سوى بناء الزمرة لفئة الترددات، وبالطريقة نفسها، يكتب التطور في الزمن لهذه الملحوظات ببساطة بدءًا من القيمة الرقمية للترددات، وفي حالة الكم، تتم فهرسة الترددات الملحوظة ليس تبعًا للزمرة ولكن لفئة الأزواج (α,β).

لقد وضع هايزنبرج مبدأ، ضرورة تبديل زمرة الترددات بالبديل الكمي،أينما كان حيث يظهر في النظرية الكلاسيكي أي فئة الأزواج (α,β)، وينتج مباشرة أن الكميات الملحوظة هي ببساطة جداول أرقام $x\,\alpha\beta$ مفهرسة بالأزواج (α,β). أضف إلى ذلك أن حاصل ضرب ملحوظتين يمكن الحصول عليه ببساطة شديدة بتبديل في قاعدة الالتفاف لزمرة، قانون الزمر بقانون ريتز- ريدبرج، ونحصل على جبر معروف للرياضيين: وهو جبر المصفوفات.

لم يكن هايزنبرج يعرف أن هذا الجبر معروف للرياضيين، لقد قال: "لنسلم بأن لدينا قضية كميات ملحوظة تتركب بهذا الشكل، وتجمع بإضافة مركبات الجدول التي لها الأدلة نفسها، ولنطور كدالة في الزمن الملحوظات باستخدام القيم العددية للترددات، ولقد عمل حسابات وأدرك أن هذه العناصر ليست إبدالية فيما بينها، فحاصل ضرب مصفوفتين AB ليس نفسه BA إذن قاعدة تركيب المصفوفات ليست إبدالية.

إن الكميات الملحوظة في ميكانيكا الكم لهايزنبرج، ليست إبدالية بعكس الكميات الملحوظة التي اعتدنا عليها، فمثلاً وضعية وسرعة كوكب معطاة بست أعداد حقيقية، أي كميات إبدالية، وكذلك إذا تفحصنا فراغ الحالات الممكنة للنظام الميكانيكي المكون من الذرة، لم نعد نستطيع أن نأخذ من هذا الفراغ نموذج للتنوع

بالمعنى الذى يقصده ريمان؛ لأن اللا إبدالية تبطل العملية التى وضعها ريمان، لعمل بارامترات للنقط بعدد منتهى من الأعداد الحقيقية، فالعملية التى تخيلها ريمان تدعونا إلى قياس أولاً الإحداثى الأول ثم الإحداثى الثانى وهكذا على التوالى، وما يبينه اكتشاف هايزنبرج إنه بالنسبة لفراغ أطوار النظام الذرى، منذ القياس الأول يصبح من المستحيل قياس الإحداثيات الأخرى التى تتبادل مع الأولى بطريقة متماسكة coherente. نستطيع قطعًا أن نتحدث عن مبدأ اللا يقين incertitude ولكن هذا يخبئ مع الاحتفاظ بلغة كلاسيكية الحداثة الأساسية التى وضحها هايزنبرج والتى لها أثر على فراغات حديثة تكون إحداثياتها جبر لا إبدالى، ومن المفهوم أن هذه الجبور تبقى إدماجية associative مما يناظر كتابة اللغة، حيث .(AB)C = A(BC)

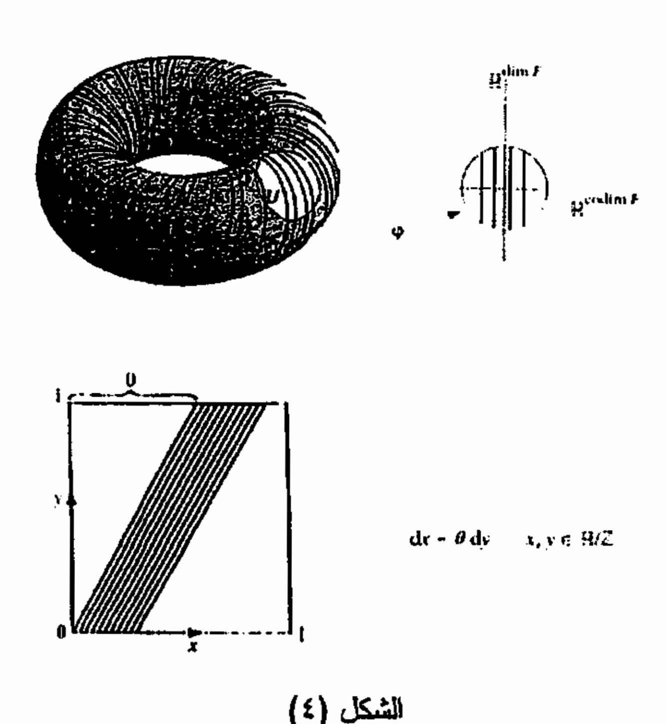
إن نقطة انطلاق الهندسة الجبرية هى الثنائية بين الفراغ الهندسى من جهة وجبر الإحداثيات على هذا الفراغ من جهة أخرى، ولكن الجبور التى تم بحثها كانت دائمًا إبدالية، ونقطة انطلاق الهندسة اللا إبدالية هو وجود فراغات طبيعية لا إبدالية تلعب دورًا أساسيًا فى الفيزياء كما فى الرياضيات، والتى لا يخضع فيها جبر الإحداثيات لقانون الإبدال، فالوجود والتأسيس السليم لهذه الفراغات يرجع بلا شك لهايزنبرج، ولكن هناك مبدأ رياضى يبين أنه حتى فى قلب الرياضة من الأساسى مد كل مصنع الهندسة إلى "فراغات لا إبدالية"؛ أى إلى فراغات مناظرة لجبر الإحداثيات اللا إبدالية.

ومبدأ البناء هو الآتى: إذا فكرنا فى معظم الفراغات التى تهمنا، من النادر أن نستطيع تهجى العناصر واحدًا فواحدًا. عمومًا، إن عنصرًا فى الفراغ يعرف كفئة classe. بالفعل إذا انطلقنا من فراغ Y أكبر كثيرًا منX الذى يهمنا وX يمكن الحصول عليه بدءًا من Y بالتطابق فيما بينهما بعناصر من Y. نقول إن X هى خارج قسمة Y. ليكن a,b نقطتان فى Y نريد أن نطابقهم. الطريقة الأولى للوصول إلى ذلك تدفعنا إلى عدم الاهتمام سوى بالدوال على Y التى تبقى قيم a,b

عندها كما هى. من الواضح أننا يمكن أن نحصل على جبر الدوال على X كجبر جزئى من جبر الدوال على Y وأن الإبدالية بذلك وُرِثَت عن طريق جبر الإحداثيات على X.

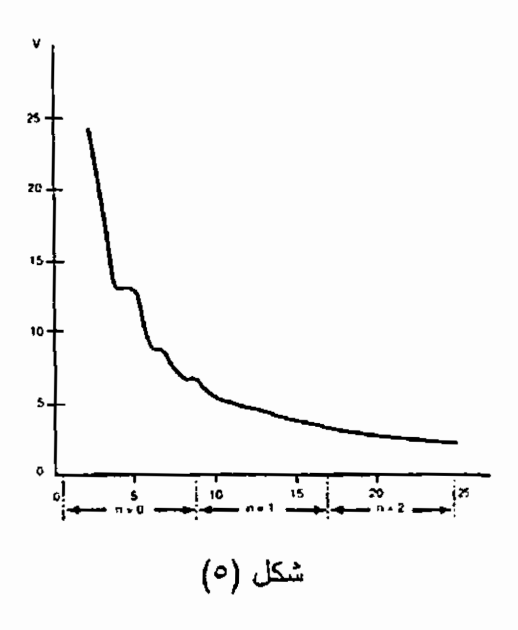
عندما نتفحص مواقف أكثر حساسية، هناك طريقة أخرى للتصرف تكون أكثر إخلاصًا لدقة عملية خارج القسمة وهى مأخوذة عن هايزنبرج، وإنها تكمن فى الاحتفاظ بكل جبر الدوال على Yولكن بإدخال تطابق النقط a,b فيما بينهما ببساطة بإعطائهما إمكانية التواصل بفضل العناصر خارج أقطار المصفوفات اثنين فى اثنين مفهرسين a,b. نحصل بذلك على جبر غير إبدالى سيعمل على تكويد عملية خارج القسمة بطريقة أكثر إخلاصًا وسلاسة من العمليات العنيفة التى تحافظ على الإبدالية.

لقد بدأت النظرية منذ عشرين عامًا بأمثلة لا تتأسس نظرية رياضية مهمة على تعميمات مجردة، ولكنها تتغذى بأمثلة، وفى الحالة التى تهمنا، هناك الكثير من الأمثلة الآتية ليس فقط من الفيزياء بل ومن الهندسة أيضًا. إذا بدأنا من المعادلة التفاضلية $dx=\theta\ dy$ على الطوق الذى نحصل عليه بتطابق أطراف المربع المتقابلة (شكل ٤). لتكن X فئة حلول المعادلات التفاضلية، وإذا حاولنا وصف X بالطرائق التقليدية بأن نصفها بجبر الإحداثيات المكون من الدوال العددية، نجد شيئًا عجيبًا، ونجد (فى حالة θ غير نسبية) لا يوجد دالة غير ثابتة على X بذلك لا نستطيع تمييز X عن نقطة.



الشكل (٤)

بالفعل إذا استخدمنا الطريقة الأخرى لوصف خارج قسمة x بفضل اللا إبدالية، نحصل على جبر مهم جدًا هو جبر الإحداثيات على الطوق اللا إبدالي. ولهذا الفراغ اللا إبدالي قصة مهمة، ولقد ظهر في مجالين مختلفين كليًا من الفيزياء. من ناحية في تأثير هول Hall الكمي بفضل أعمال جون بليسارد Jean Belissard التي ربطت قانون التوصيل لهول بلا متغيرات طوبولوجية قد أدخلتُها (على لسان الكاتب كون) في عام ١٩٨٠، والتي تكامليتها مرتبطة بالتكاملية الملحوظة بالتجربة على أطباق التوصيل (شكل ٥).



شكل (٥)

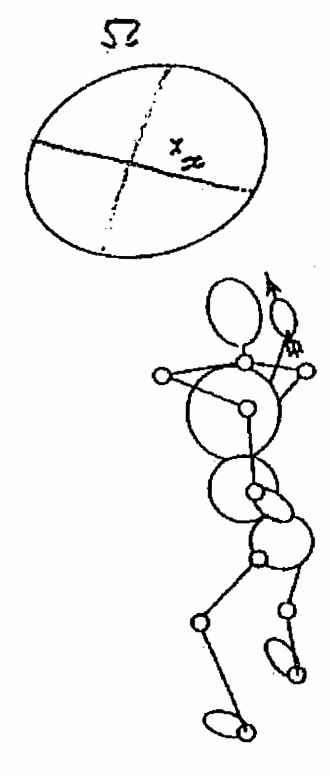
إن الظهور الثانى للحلقة غير الإبدالية فى الفيزياء هو أحدث كثيرًا ويرجع تاريخه إلى عام ١٩٩٧. وهو يظهر بشكل طبيعى فيما نسميه اليوم **نظرية الأوتار** ونظرية أخرى أحسن أعدادًا وهى نظرية – م M-Theorie، ولقد وجد الفيزيائيون لأسباب غير بديهية على الإطلاق، أن العنصر الرياضى نفسه أو الطوق اللا إبدالى ظهر فى نظريتهم دون أن يكونوا فى حاجة إلى إدخاله بشكل صناعى، ومنذ ذلك الوقت ظهر أكثر من ألف مقال فى هذا الموضوع.

إنى أميل إلى إعطائكم فكرة حدسية (تخمينية) عن الطوق الغير إبدالى، وهى غريبة جدًا، وإذا حاولتم إسقاطه على فراغ أحادى البعد ستحصلون على مجموعة كنطور ensemble de Cantour أى مجموعة غير متصلة كلية (عندما θ تكون غير نسبية)، وفى البداية بدا ذلك كما لو كان شيئًا سريًا تمامًا. إن الذى أطلق الهندسة غير الإبدالية هو نوع النظريات نفسها التى تكون حقيقية فى الهندسة العادية مثل: نظرية جاوس- بونيه Gauss-Bonnet، والنظريات التكاملية تبقى

حقيقية فى هذه الهندسة، ولفهم هذه الفراغات الهندسية، يجب بشكل أو بآخر إعـــادة كتابة كل ما نعلمه عن الرياضيات. ويجب أن نبدأ بنظرية القياس. ونأخذ فراغ ولا ننظر سوى إلى العناصر بداخله. إذا بدلنا هذه العناصر لن يتغيــر شـــىء، وفـــى الإبدالى نظرية القياس تكون هى نفسها نظرية لبزج الموضوعة فى بدايـــة القـــرن العشرين، وليس صعبًا جدًّا؛ لأن كل الفراغات المستمرة تكون هـــى نفـسها مـــن منظور نظرية القياس. والمفاجأة التى عملت على انطلاق الهندسة غير الإبداليـــة، هى ظاهرة مدهشة جدًّا، حتى من منظور نظرية القياس نـدرك أن الفـــراغ غيـــر الإبدالى يدور فى حين أن الفراغ التقليدى لا يتحرك، فالفراغ غير الإبدالى يتطـــور مع الزمن إنه يدور مع الزمن، ويرث بمعجزة تغير الزمن الـــذى هـــو تـضمين modulo شرعى تمامًا للتشاكلات الذاتية automorphismes الداخلية، وهذا التغير مرتبط بعمق بميكانيكا الكم.

بمجرد اكتساب نظرية القياس، قمنا بتطوير المعادل الطوبولوجى التفاضـــلى بفضل التماثل cohomologie الدورى الذى له الكثيـــر مـــن التطبيقـــات، وبقـــى للوصول لمرحلة الهندسة صعوبة رئيسية: لتطوير الهندسة استخدم ريمان الحساب متناهى الصغر بطريقة رئيسية، وسأقوم بشرح ما هو المعادل للحـساب متنـــاهى الصغر، فى الهندسة غير الإبدالية حاكيًا لكم حكاية.

عندما كنت فى مدرسة École Normale فى سنوات ١٩٦٦-١٩٦٧ كنـــت منبهرًا بكتاب كان يهتم بما نسميه التحليل غير القياسى l'analyse non standard، وكان يبحث فى إعطاء ترجمة دقيقة لما يسمى متناهى الصغر، فهو مفهوم حدســـى وكان هذا الكتاب يريد أن يعطى له صيغة دقيقة، ولقد انطلق من الـــسؤال الـساذج الآتى المعنى بلعبة الأسهم. (شكل ٦) لتكن x نقطة من الهدف (لوحة التـــصويب) السؤال هو "ما احتمال dp (x) أن السهم يصل بالضبط فى النقطة x؟"



شكل (٦)

من السهل تقسيم لوحة التصويب لجزءين متساويين بحيث إن النقطة x ستوجد في واحدة من الاثنين ونستنتج أن:

$$dp(x) < ½$$

بتكرار هذه العملية نحصل على

$$dp(x) < ¼$$

و بالفعل

$dp(x) < \varepsilon$ لكل ε موجبة.

إذ قبلنا أن dp(x) عدد موجب ونستنتج أن dp(x)=0. من الواضح أن هذه النتيجة ليست مرضية؛ لأنه فى كل مرة نرمى السهم جهة لوحة التصويب فإنه يجب أن يقع فى مكان ما، ويستطيع الرياضى المتعلم جيدًا أن يفكر بداهة أنه يعرف الإجابة الصحيحة، أو الشكل الثنائى 2-forme على اللوحة (أو قياس ما) ولكن يصعب عليه إعطاء إجابة قيمة إذا طلبنا منه أن يحسب

أس dp(x) /1-.

إن كتاب التحليل غير القياسي يفترض كحل "عددًا غير قياسي" يأتى من مفاهيم معقدة للمنطق الرياضى، وبعد ستة أشهر من دراسة المنطق، أدركت أن الحل المقترح لم يكن مرضيًا؛ لأنه كان يستخدم تمامًا ما رفضه ليبزج فى نظريته للتكامل؛ أى الدوال غير القابلة للقياس، ونستطيع استنتاج نتائج لبيزج ونتائج أكثر حداثة ترجع لبول كوهن Paul Cohen وسولوفاى Solovay، حيث لم يستطع أحد أن يسمى عدد ما عدد غير قياسى، والنظرية المقترحة هى نظرية افتراضية بالكامل تتداول أشياء خيالية.

لقد استجوبت لعدة سنوات لمعرفة إذا كان يمكن إعطاء إجابة مرضية على السؤال الأساسى، وفهمت مؤخرًا أن ميكانيكا الكم تعطى إجابة بسيطة ومفيدة جدًا، سمحت بتطوير المناظر لحساب المتناهى الصغر فى الهندسة غير الإبدالية، ولإيجاده يكفى النظر بالتفصيل فى القاموس الذى يضع نصب عينه التقليدى والكمى.

تأخذ الكمية الملحوظة التقليدية قيم حقيقية، فهى متغير حقيقى. وفى ميكانيكا الكم يكون مؤثر حقيقى auto –adjoint معاون – ذاتى فى فراغ هيلبرت espace de Hilbert، وبالنسبة لهذا الموضوع نجد أنه من المدهش أن هيلبرت عرّف فى عام ١٩١٠ طيف المؤثر قبل أن نعرف أن هذا المفهوم سينطبق مع علم الطيف التجريبى، ولكن المصطلحات كانت هى نفسها! فطيف المؤثر هو مجموعة القيم الممكنة للمتغير الحقيقى، وعندما يكون المتغير المساعد- ذاتيًا متغيرًا حقيقيًا.من الملحوظ أنه كان يوجد بقاموس ميكانيكا الكم المكان المطلوب تمامًا لمتناهى

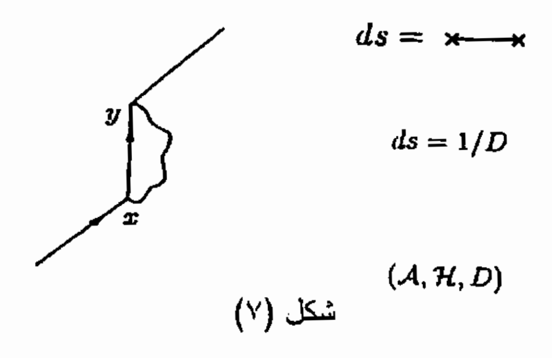
الصغر، ويوجد فى ميكانيكا الكم مؤثرات T غير صفرية ولكن حجمها أصغر من ε لأى ε موجبة! فى الحقيقة أن الشرط الصحيح هو "أيًا كانت ε موجبة نستطيع أن نضع شروطًا على المؤثر؛ أى نجد عددًا نهائيًا من الشروط الخطية، بحيث أن نجعل حجمه صغير جدًا أصغر من ε". يوجد فى الكمى المواد المطلوبة تمامًا لتشكيل وفهم الفكرة الحدسية لمتناهى الصغر، ولا يوجد فى النظرية التقليدية مثل هذه الفكرة، لأن المتغيرات ذات الطيف المستمر لا تستطيع أن تتواجد مع متناهى الصغر إلا إذا كانت غير إبدالية، ويمكن إذن تعريف ما هى مشتقة المتغير. وهى تعطى بمبدل للمؤثرات بالطريقة نفسها التى يفسح بها خطاف بواسون المجال فى الميكانيكا التقليدية الطريق للمبدلات فى ميكانيكا الكم.

إن التكامل هو مفهوم أكثر رقة يأتى من اكتشاف ل ج. ديكسمر J.Dixmier للآثار التى هى منعدمة فى المتناهى الصغر من رتبة أكبر من واحد، ومن جهة أخرى فمن المدهش أن هذا الاكتشاف كان مدفوعًا فى البدء بالبحث عن مثال معاكس عن وحدة الأثر المعتاد للمؤثرات، ففى مثال لوحة التصويب، تعطى الإجابة بمعكوس لابلاسى لديريشليه Dirichlet.و تتوقف هذه الإجابة بشكل دقيق على شكل لوحة التصويب، ويعيد حساب التكامل إعطاء احتمال مألوف، ولكن يمكن أن نجرى به حسابات كانت غير ممكنة من قبل مثل أس 1/dp(x)-.

سأنهى حديثى بالمناظر لمفهومين يعتبر مفاتيح هندسة ريمان، ذلك الخاص بالمتنوع التفاضلى، والآخر الخاص بوحدة الطول المتناهى الصغر ds.

فالمتنوعات العادية معرّفة بإعطاء وصفة مطبخية تسمح بإعادة لصق مجالات الإحداثيات المحلية فيما بينها، ولكن نجح الرياضيون فى فهم ماهية الخواص الفكرية المهمة للفراغات التى نحصل عليها، وثنائية بوانكاريه Poincaré هى واحدة من بينهم ولكن يجب دعمها أكثر باستبدال التماثل العادى homology بنظرية أرقى هى K-homology، ولن نضبط فئات بونترجاجان Pontrjagin التى هى لا متغيرات رئيسية للمتنوعات سوى بهذا الثمن، وكذلك فإن إحدى الخواص

الرئيسية للتغير هى أن يملك دورة رئيسية فى الـ K-homology. يعتبر اكتشاف م. ف. عطية أحد أحجار الزاوية للهندسة غير الإبدالية وهو يسمح بتفسير الدورات فى الـ k-homology كتمثيلات لجبر الإحداثيات فى المشهد الكمى الموصوف بأعلى. على الأخص فقد اختفى كل أثر للغير إيدالى وهناك نتائج عديدة، خاصة فى طوبولوجى المتنوعات غير المتصلة ببساطة، أثبتت أن الإطار غير الإبدالى مثالى لمعاملة الـ K_homology. يبقى أن نفهم كيف نطوع ds لريمان، وكان يكفى هنا مرة أخرى تصفح أعمال الفيزيائيين المعاصرين لإيجاد الإجابة، ونجد الرسم التخطيطى الموجود (بشكل ٧) دائمًا فى الكهروديناميكا الكمية ويصف انبعاث فوتون من إلكترون فى نقطة x وإعادة امتصاصه فى النقطة y، وتعريف العنصر الذى طوله ds بسيط جدًا وممثل فى (شكل ٧).



شكل (٧)

بذلك يكون ds هو الناشر للفرميونات[٧٢] fermions بمعنى أنه عكس مؤثر د. ديراك Dirac.D، ونصل هنا إلى المفهوم الرئيسى للطيف الثلاثى، وهو مفهوم متقلب بشكل مدهش لم يعد مقيد بحالة الإبدالية، ويعطى أفضل نموذج للزمكان (مفهوم الزمن – المكان لأينشتاين) ويتواءم تمامًا مع البعد اللانهائى ويلعب دورًا مهمًا فى التحقيق الطيفى لأصفار الدوال L من نظرية الأعداد.

---

(٧٢)فرميون هو جزئ صغير ذو سبين spin نصف عدد صحيح .....3/2، 1/2 وقد اكتشفها إنريكو فرمى Enrico Fermi.

الباب الثانى

أهم الأسئلة فى علم الكون

أهم الأسئلة فى علم الكون[1]

بقلم: جين أودوز
Jean AUDOUZE

ترجمة: عزت عامر

من بين المواد التعليمية المختلفة للمعرفة التى يتم تقديمها فى هذه الحلقة من المحاضرات، يتعلق الأمر هنا بما يهمنا بالنسبة للكون فى مجمله: هل من الممكن، من الناحية العلمية، أن نفهمه فى مجموعه وخواصه وصلاته بالزمن (سيان كان كونًا لا يتبدل وثابتًا أو كونًا فى حالة تطور)، هذا ما يراهن عليه بالفعل علماء الفيزياء الفلكية، المتخصصون فى علم الكون: وهو ما نقوم به بالطبع بأنفسنا، بوصفنا نحن البشر (وكل ما يحيط بنا)، جزءًا متممًا لهذا الكون القابل للملاحظة، الذى يعتبر أيضًا من حيث جوهره شيئًا فريدًا من نوعه. ونحن علماء الكون لدينا طموح لأن نطبق على هذا الكون المناهج نفسها المستخدمة فى العلوم الأخرى للطبيعة: ونحن فى الواقع جزء من "التجربة". وهذه "التجربة" لا يمكن أن تُستنسخ، ومع ذلك نأمل أن نكون قادرين على فهم العالم بطريقة عالم الفيزياء أو عالم الكيمياء أو عالم البيولوجيا.

وعلم الكون، مثل مجالات المعرفة الأخرى، له تاريخ. وفى الوقت نفسه يروى هذا التاريخ تقلبات التصورات العقلية عن الكون ويعبر عن تقدم التجهيزات والتقنيات، وكذلك ما حدث من تطور فى النظريات الفيزيائية (نظريات الجاذبية والإلكترومغناطيسية، وميكانيكا الكم والنسبية...). ويصل عمر علم الفلك إلى ٥٠٠٠ سنة على الأقل حيث تم اكتشاف أول آثار ذات أهمية مكسوة برصد للسماء على الأطلال التى تركتها حضارات ما بين النهرين فى الألفية الثالثة قبل عصرنا. ورغم ازدهار أعمال متميزة مثل تلك التى ترجع إلى إيراتوستينيز[2] الذى يعتبر

---

(١) نص المحاضرة رقم ١٨٢ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٣٠ يونيو ٢٠٠٠.
(٢) إيراتوستينيز Eratosthene القوريني رياضى وجغرافى وفلكى يونانى قديم. (المترجم)

أول من حسب نصف قطر الأرض فى القرن الأول قبل الميلاد، وإلى علماء الفلك اليونانيين والعرب الذين رصدوا وحللوا ضمن أشـياء أخـرى حركـة الكواكـب وأشكال كوكبات النجوم، كان يجـب انتظـار عـصر النهـضة ونـشر مؤلـف كوبرنيكوس[٣] "Revolutionibus Orblum Caelesthuin" فى ١٥٤٣ حتـى يـتم الانتقال من كون تحتل الأرض مركزه geocentrique إلى تصور مركزية الشمس heliocentrique، مع الأخذ فى الاعتبار حركة الأرض والكواكب حول الـشمس. ولقد "اخترع" كوبرنيكوس بالفعل هذا التصور الجديد الذى لم يتبناه مجتمع العلمـاء فيما بعد ولم يتم الاعتراف به إلا قسرًا تقريبًا بعد نحو قرن من نشر هـذا العمـل، الذى لم ينجُ من مواجهات مشهورة مثل القضية التى أقامتها الكنيسة ضد جـاليليو. ومع ذلك فإن مبدأ مركزية الشمس هذا كان قد طُرح سابقًا بواسطة أرسـطوطاليس من ساموس Aristarque de Samos منذ سنوات ٣١٠: ٢٣٠ قبل الميلاد.

ولم تظهر أول المناظير الفلكية والتلسكوبات سوى فى القرن السابع عـشر. ووضع إسحاق نيوتن Isaac Newton نظرية الجاذبية العامة مدعمًا إياها بأعمـال جاليليو Galilee وكبلر Kepler. وكان كبلر هو الذى صاغ فـى الواقـع قـوانين حركة الكواكب حول الشمس والتى ظلت صحيحة أيضًا حتى وقتنا الراهن. لكـن الكون، وإن كان يتبع مركزية الشمس بالفعل، سيظل "محدودًا" حتى بدايـة القـرن العشرين، حتى يأتى عالم الفلك الأمريكى هارلو شابلى Harlow Shapley ليبرهن خلال السنوات (١٩١٤ - ١٩٢٠) على أن الشمس لا تقع فى مركز مجرتنا، مجرة درب اللبَّانة، لكنها على العكس توجد بعيدًا على مسافة تقترب مـن ٣٠٠٠٠ سـنة ضوئية. وقام هذا البرهان على أساس توزيع حشود النجوم المعروفة باسم "الحشود النجومية الكروية"[٤] فى الفضاء، وهى التى تتكون من نحو مليـون نجـم تعتبـر

---

(٣) نيقولاوس كوبرنيكوس Copernic (١٤٧٣ - ١٥٤٣): عالم فلك بولندى قـال بـأن الأرض وسـائر الكواكب السيارة تدور حول الشمس وحول نفسها. (المترجم)

(٤) الحشود النجومية الكروية amas globulaires: الحشد الكروى هو تجمع من عدد كبيـر مـن النجـوم بتركيز كبير ناحية مركز الحشد (على خلاف الحشد المفتوح). وعُرف حتى الآن نحـو ١٢٠ حـشدًا كرويا فى مجرة درب اللبانة. (المترجم)

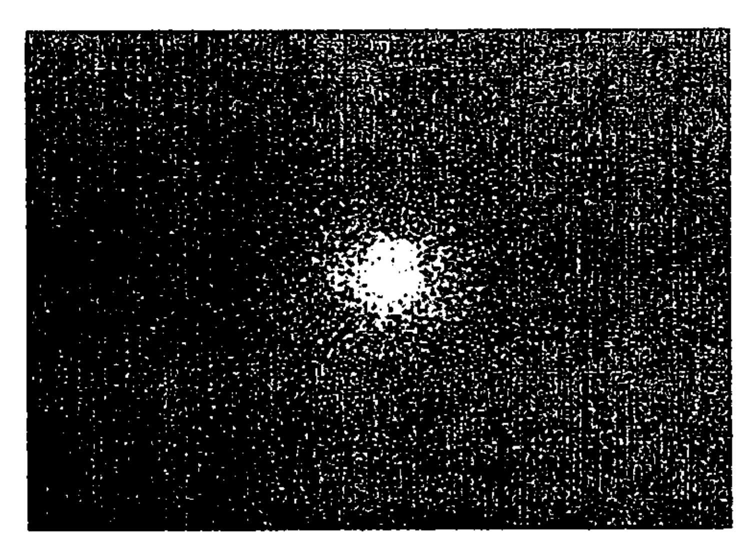
أعمارها طويلة بشكل خاص (الشكل ١). ويصبح هذا التوزيع موحد الخـــواص إذا كان مركز المجرة موجودًا على هذه المسافة فى اتجاه برج القـــوس (أو الرامـــى) Sagittaire. وأثبت هـــ. شابلى أيضًا أن كثيرًا من الأجرام السديمية مثـــل ســـديم المرأة المسلسلة(٥) ليست سوى مجرات تماثل مجرتنا، مجرة درب اللبّانة وتقع على مسافات شاسعة جدًا منا (مليونى سنة ضوئية فى حالة هذه المجرة) والتى تمثل مع ذلك جزءًا من "مجموعة المجرات المحلية" التى تنتمى إليها مجـــرة درب اللبّانـــة وسحابتا مجلان(٦) الكبرى والصغرى. من هنا فإن المجموعة الشمسية تحتل منطقة عادية وعديمة الأهمية فى الكون الذى يمكن رؤيته والتى تتكون من مليار مجـــرة على الأقل، تحتوى كل منها على بضعة مئات (٢٠٠ بالنسبة لدرب اللبّانـــة) مـــن المليارات من النجوم مثل الشمس.

ولرصد الكون فى مجمله وأيضًا مكوناته الأكثر ضـــخامة والأكثـــر دقـــة، أعددنا منذ حوالى ثلاثين سنة وسائل ذات أداء أفضل فأفضل، استنفرت ليس فقـــط تقنيات علم فلك الكون المرئى ولكن أيضًا تقنيات الكون غير المرئـــى. ولا يمكـــن لأعيننا فى الواقع أن تشعر بالأشعة الكهرومغناطيسية التى تتراوح أطوال موجاتها بين ٤٠٠ (للبنفسجية) و٨٠٠ (للحمراء) مانومتر. والأشعة من هذا النوع التى لهـــا أطوال موجات أكثر طولاً تكون أقل طاقة : وهى أطـــوال تتطابق مع الأشعة تحت

---

(٥) سديم المرأة المسلسلة nebuleuse d`Andromede: هو سديم موجود فى كوكبة المرأة المسلسلة يـــشاهد بالعين المجردة كبقعة سديمية صغيرة مضيئة. (المترجم)

(٦) سحابة مجلان Nuage de Magellan: اثنتان من المجموعات النجوميـــة الخارجيـــة نراهمـــا بـــالعين المجردة كبقع سديمية فى كوكبات التنين والجبل (سحابة مجلان الكبرى) والطوقان (ســـحابة مجـــلان الصغرى) فى نصف الكرة السماوية الجنوبى. وقد سميتا بهذا الاسم تبعًا للبحـــار البرتغـــالى مجـــلان (١٤٨٠ - ١٥٢١). (المترجم)



شكل (١)

الحشود النجومية الكروية M13 (الجرم ١٣ فى مصنف مسييه)[٧] تتم مشاهدتها فى اتجاه كوكبة الجاثى[٨] (التقطت الصورة بواسطة تلسكوب ١٩٣ سم فى مرصد أوت بروفينس Haute _ Provence التابع المركز القومى للبحث العلمى CNRS). ويبعد هذا الحشد عنا ٢٥٠٠٠ سنة ضوئية، وله قطر ٣٣ سنة ضوئية، ويشتمل على أكثر من ١٠٠٠٠٠ نجم، وعمره بالتقريب ١٥ مليار سنة مما يجعله يقترب من عمر الكون المرئى.

الحمراء، بالمليمترات وموجات الراديو حيث إطوال الموجات تتراوح بين بضعة سنتيمترات حتى أكثر من عشرة أمتار. والأشعة الأكثر طاقة من الأشعة المرئية

---

(٧) مسييه Messier: هو تشارلز مسييه (مسيى) الفلكى الفرنسى المولود فى ٢٦ أبريل ١٧٤٠ فى باريس والشهير بإصداره مصنف مسييه للنجوم والبقع السديمية والحشود النجومية. وتستعمل أرقام هذه الأجسام فى مصنف مسييه تحت اسم أعداد مسييه (حرف M متبوع بعدد). (المترجم)

(٨) كوكبة الجاثى Hercule: إحدى كوكبات نصف الكرة الشمالى التى تظهر فى ليالى الصيف. وألمع نجم فيها هو رأس الجاثى. ويوجد فيها عدة حشود نجومية، ومن السهل العثور بينها على الحشد الكروى M13 كبقعة سديمية خافتة. (المترجم)

هى الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية وأشعة جاما. والأشعة المرئية، وأشعة الراديو هى الأشعة الوحيدة التى يمكن رصدها من الأرض (تم رصدها فى الفلك الراديوى radioastronomie منذ نهاية الحرب العالمية الثانية). وليس من السهل رصد أنواع الأشعة الأخرى إلا من الفضاء (المناطيد وبشكل خاص الأقمار الصناعية التى تضاعفت منذ أول طيران لسبوتنيك Spoutnik فى ١٩٥٧). وأصبحت التلسكوبات البصرية أكثر فأكثر ضخامة: ولها أقطار قد تصل فى الوقت الراهن إلى عشرة أمتار وتتيح رؤية أجرام سماوية بعيدة جدًا وبذلك نرصد ماضيًا مر عليه عدة مليارات من السنوات، مع الوضع فى الاعتبار الخاصية المحددة لسرعة الضوء. وصار لتلسكوب الفضاء هابل Hubble، الذى أُطلق فى ١٩٩٠ وأصبح قابلاً تمامًا للتشغيل منذ ١٩٩٣، قدرة ضخمة على مراقبة السماء فى المجال المرئى والأشعة فوق البنفسجية وتحت الحمراء القريبة على ارتفاع ٥٠٠ كم، مما يحرر عملية الرصد من الحدود التى يفرضها الغلاف الجوى للأرض.

ولا يكتفى علماء الفيزياء الفلكية برصد هذه الأشعة الكهرومغناطيسية، ويهتمون أيضًا بالأشعة الكونية بشكل خاص. فهذه الأشعة الكونية هى قبل أى شىء التى تتكون بشكل أساسى من نوى ذرات ذات طاقة عالية ومن ثم تتحرك بسرعة مرتفعة جدًا، والتى لا تتوقف قصف الأرض (وكذلك نحن!). ويكتشفون أيضًا منذ وقت حديث جسيمات تحتفظ هى الأخرى بسرها: جسيمات النيوترينو neutrinos. وتنبعث هذه الجسيمات من المناطق المركزية للنجوم ومن ثم الشمس حيث تجرى تفاعلات نووية تنتج هذه الجسيمات، أو أيضًا خلال الانفجارات العنيفة للنجوم ذات الكتل الضخمة (ظواهر انفجار السوبر نوفا)[٩].

وأصبح اكتشاف موجات الجاذبية ondes gravitationnelle (ومن الصعب بشكل خاص توضيحها بسبب الضعف النسبى لتفاعل الجاذبية مقارنة بالتفاعلات

---

(٩) السوبر نوفا supernova: نجم متغير تحدث له زيادة فى اللمعان تصل أحيانًا إلى ٢٠ قدرًا، مما يؤدى إلى زيادة شدة الإشعاع ١٠٠ مليون مرة، وعلى ذلك فإن السوبر نوفا له تغير فى اللمعان يزيد بنحو ١٠ مرات عن التغيير فى لمعان النوفا العادى. (المترجم)

الثلاثة الأخرى، التفاعل الكهرومغناطيسى والتفاعلين النوويين الشديد والـضعيف)، التى من المحتمل انبعاثها خلال انفجارات النجوم أو خلال اختفائها فى الثقوب السوداء، أمرًا على وشك الحدوث فى أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية وفى انتظار رصدها من الفضاء خلال السنوات (٢٠١٠ - ٢٠٢٠). وفضلاً عن ذلك، ومن أجل الأسباب التى يتم تقديمها لاحقًا، يجب أن تتيح تجارب فيزياء الجسيمات التى تقوم أو ستقوم بها المسارعات الموجودة أو المستقبلية فى المختبر الأوروبى لفيزياء الجسيمات CERN، فهم طبيعة المادة التى تشكل الكون فى مجمله.

لذلك فإن تهيئة هذه الوسائل لبحث ما هو بالغ الضخامة وما هو بالغ الصغر إضافة إلى نظريتين أساسيتين فى الفيزياء - وهما ميكانيكا الكم والنسبية واللتان تم استنباطهما فى بداية القرن العشرين - تتيح لنا المخاطرة بصياغة الأسئلة الأساسية فى علم الكون ومحاولة الإجابة عنها.

وقبل أن نقوم بهذه المهمة من الملائم أن نستعرض بعض الحقائق المتعلقة بالموضوع ونحصرها وسنثبت من خلالها قلة عددها قياسًا إلى تعقد المشاكل التى يثيرها علم الكون. وعدد هذه الحقائق ثلاث.

الكون "ذو بنية" على جميع المستويات

الكون ذو بنية على كل المستويات من العناصر المجهرية وهى الجسيمات الأولية ونوى الذرات، حتى الأجرام السماوية ذات الأبعاد "الفلكية" وهى النجوم والمجرات وركامها. يتم الحصول على بروتون proton ونيوترون neutron بواسطة ثلاثة كواركات quarks. والبروتون يتكون من كواركين علويين بشحنة + ٣/٢ وكوارك سفلى شحنته - ٣/١، وبذلك تكون شحنته + ١. ويتكون النيوترون من كوارك علوى وكواركين سفليين، ولذلك يكون متعادلاً وشحنته صفر. ويتم انتقال أحدهما إلى الآخر بأن يتكون كوارك علوى من كوارك سفلى (والعكس بالعكس) مع انبعاث بوزيتون positon (مضاد الإلكترون electron) ونيوترينو

neutrino. ويتحول الكوارك السفلى إلى علوى مع انبعاث إلكترون ومضاد نيوترينو. وتنجم تحولات الكواركات هذه عن التفاعل النووى الضعيف حيث إنها تدخل في الإلكترونات (أو البوزيتونات) وجسيمات النيوترينو (أو مضادات النيوترينو). ويتعلق اندماج الكواركات فى النويات nucleons بالتفاعل النووى القوى. وبواسطة نوية أو عدة نويات (بروتون ونيوترون) نحصل على نواة الذرة التى تكتمل بحاشيتها الإلكترونية.

ويتكون أى نوع كيميائى محدد (مثل الهيدروجين أو الكربون أو الحديد) من ذرات يكون عدد البروتونات فى كل منها (أى العدد الذرى) فيها هو نفسه دائمًا: ١ للهيدروجين و٦ للكربون و٢٦ للحديد. وتكون أى ذرة متوازنة كهربائيا عندما تحتوى حاشيتها الإلكترونية على عدد إلكترونات مساو للعدد الذرى للعنصر الكيميائى المحدد. فإذا لم يتوافر هذا الشرط نكون أمام إيون ion، يكون موجبًا إذا كان هناك نقص فى الإلكترونات أو سالبًا إذا كان هناك فائض فى الإلكترونات. وقد يجمع النوع الكيميائى نفسه نوى ذرية ذات كتل ذرية مختلفة، أى تكون له أعداد مختلفة من النيوترونات بما أن هذه الكتلة الذرية تمثل مجموعة النويات التى يُطلق عليها نواة. وهناك كذلك نظائر تتصف بالخواص الكيميائية نفسها للعنصر لكن خواصها النووية تكون مختلفة، الدتريوم deuterium هو نظير ثقيل للهيدروجين، ويوجد الكربون فى الطبيعة على هيئة ^{12}C وC^{13}، أما ^{14}C فله نشاط إشعاعى، ويستخدم علماء الآثار مثلاً تحلله "مقياسًا زمنيًا chronometre".

وبواسطة الذرات تتكون المادة التى نتكون نحن أنفسنا منها، وكذلك كل ما يحيط بنا.

ثم نأتى بعد ذلك إلى الكواكب، والنجوم والمجرات حتى التكوينات الهائلة للكون.

وتحتل النجوم مكانة خاصة فيما أحصيناه حيث إنها، تبعًا لصيغة ميشيل كاسيه Michel Casse، مفاعلات اندماج نووية حرارية thermonucleaire تعمل

بفضل ما تتصف به من "حصر جـــاذبى confinement gravitationnel". وتلمـــع النجوم فى الواقع بطريقة مستقرة جدًا خلال فترات زمنية يمكن أن تتجاوز عـــشرة مليارات سنة فى حالة النجوم التى لها كتل تساوى كتلة الـــشمس أو أقـــل منهـــا. والحقيقة أن مفاعلات الاندماج النووى الحرارى التى تمتد فى مناطقها المركزيـــة تحوّل ببطء جزءًا من المادة النووية إلى إشعاع عند انتقال الهيدروجين إلى هليوم، والهليوم إلى كربون وإلى أكسجين... ولنكن فى علمنا أن أغلب العناصر الكيميائية التى نتكون منها تخلقت خلال انفجارات نجوم ذات كتل تتراوح على الأقـــل بـــين خمسة وثمانية أضعاف كتلة الشمس، خلال ظاهرة السوبرنوفا. ومن ثم فنحن مـــن بقايا النجوم الضخمة واتتنا فرصة الدوران حول نجـــم ذى كتلـــة صـــغيرة وهـــى الشمس، التى تطورت كذلك ببطء شديد، فسمحت من ثم بعمليات على درجة مـــن التعقيد أدت إلى نشأة الحياة التى ظهرت على سطح الأرض.

ويمكن تفسير بنية الكون هذه بأنها نتيجة قوتين أساســيتين: القـــوة النوويـــة الشديدة (التى تدعم التحام المادة النووية) والتى جمعت الكواركات فيما بينها داخـــل نوى الذرات، والقوة النووية الضعيفة التى تنظم عملية تحول بعض الكواركات إلى كواركات أخرى، والبروتونات إلى نيوترونات (أو العكس) والتـــى تعتبـــر أصـــل ظاهرة النشاط الإشعاعى، وتؤثر على المستوى بالغ الصغر (داخل نـــواة الـــذرة). و"تشكل" القوتان الأخريان، وهما الأكثر ألفة بالنسبة إلينا، التفاعل الجاذبى والتفاعل الكهرومغناطيسى، الكون على المستوى الضخم.

الكون المرصود هو نفسه إذا صح القول،
مهما كان المكان الذى نرصده منه

بالنسبة لوجهة النظر هذه، وبعكس الرؤية القائلة بكون تحتل الأرض مركزه التى كان يتبناها أسلافنا، فإن الأرض ومكوناتها والمجموعة الشمسية هى عناصـــر من الكون عادية تمامًا وليس لها صفات خاصة. وهذا هو سبب التفكير بأن الحيـــاة

الذكية يجب أن تكون موجودة خارج الأرض، حتى لو كانت المسافات الفاصلة بين الأماكن التى استطاعت الحياة أن تتطور فيها، لا تتيح إثبات هذا الفرض. وكل شيء يدعو أيضًا إلى الاعتقاد بأن قوانين الفيزياء القابلة للتطبيق حاليًا علينا وعلى ما يحيط بنا مباشرة هى القوانين نفسها التى تحكم سلوك الكون فى مجمله، وفى كل العصور. ولقد حاول بلا جدوى عالم فيزياء بمثل موهبة البريطانى بول ديراك Paul Dirac وضع نظرية كونية قائمة على تغير ثابت الجاذبية مع الوقت. ولم ينجح أكثر منه من جاءوا فى عقبه!

دعنا نذكر عند هذه النقطة أن كثيرًا من علماء الفلك، تمسكوا على أثر براندون كارتير Prandon Carter من مختبر ميدون Meudon، بما يطلقون عليه "قاعدة الارتباط بالبشر principe anthropique" التى تبعًا لها فإن الكون نشأ ليفضى إلى ظهور الحياة والإنسان. وبالنسبة لتلك القاعدة، التى توصف بأنها "قوية" والتى لا يعتقد فيها أحد تقريبًا بالفعل، بما فى ذلك ب. كارتر، يتم استبدالها بقاعدة مرتبطة بالبشر "ضعيفة" تقول ببساطة بأن وجودنا نفسه هو نتيجة طبيعية للخواص المحددة للكون. وهذا الطرح الأخير الذى أتبناه، بكل سرور، يعززه الإقرار بأن الكون المرصود لم يكن ليظل هو نفسه أبدًا لو كان أحد الثوابت الفيزيائية (ثابت الجاذبية G، والتحليل العنصرى الكمى للطاقة h، الذى يظهر فى ميكانيكا الكم، وكتلة البروتون والإلكترون، ودوام حياة النيوترون..) قد اختلف.

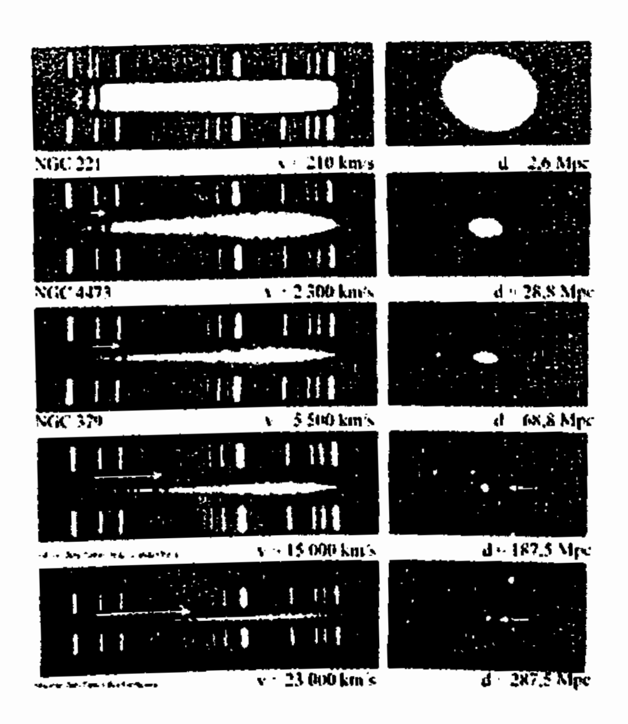
الكون فى حالة تمدد على المستوى الكبير

واستعمل عالم الفلك الأمريكى إدوين هابل Edwin Hubble أرصاد أسلافه، وبشكل خاص ملاحظات الآنسة هنريتا ليفيت Miss Henrietta Leavitt، من فيستو سليفر Vesto Slipher وفرانسيس بيس Francis Pease، ليبين خلال العشرينيات أن المجرات البعيدة تتباعد عن بعضها البعض وأن سرعة تباعدها النسبية تتناسب مع مسافتها (الشكل ٢). وبعد الكثير من النقاشات، بل والنزاعات

بين علماء الفيزيـــاء الفلكية، اتضح أن قيمة ثابت هابل H الذى يظهر فى العلاقـــة v = H x d للتعبير عن التناسب الذى تمت ملاحظته بين سرعة الإفلات v لمجـــرة تتباعد بمسافة d بالنسبة إلينا هى H = ٦٠ كم لكل ثانية ولكـــل ميجـــا فرســـخ[١٠] (١ ميجا فرسخ megaparsec يناظر مسافة ٣ مليون سنة ضوئية). ويمثـــل هـــذا الافتراض الأخير ما يطلق عليه علماء الكون قانون هابل ويتيح تحديد "عمر" للكون يصل إلى ١٥ مليار عام. ويتضمن الإقرار الذى تبعًا له يكون الليل مظلمًـــا، كمـــا وُصف بما يسمى تناقض أولبيرس paradox d`Olbers، لكن الكاتـــب الأمريكـــى إدجار بو Edgar Poe شرحه بوضوح فى بحثه أوريكا Eureka (الذى ترجمه ش. باندلير Ch. Bandelaire إلى الفرنسية)، أن الكون إما "قديم" (أى أن له بداية وأنـــه ليس موجودًا منذ الأزل"، وإما أنه فى حالة تمدد. ولقد أُثبت بشكل عام فى الوقـــت الراهن أن الكون قديم وفى الوقت نفسه يتمدد. ويمكن أيضًا تحديـــد عمـــر الكـــون بطريقتين مستقلتين، الأولى تعود إلى ألان ر. سانداج Allan R. Sandage، تلميـــذ إ. هابل، وهى تتيح تحديد عمر الأجيال الأولى للنجوم التى تؤلف ما يطلـــق عليـــه علماء الفلك الحشود النجومية الكروية، وتقـــوم الطريقـــة الثانيـــة علـــى تحليـــل، بالاستعانة بطرائق كيميائية، ما تحتوى عليه المادة الكونية من عناصـــر كيميائيـــة نشيطة الإشعاع على المدى الزمنى الطويل للحياة مثل ^{232}Th (الثوريوم)

---

(١٠) الفرسخ النجمى parsec: وحدة لقياس المسافات بين النجوم تعادل ثلاث سنوات ضوئية. (المترجم)



شكل (٢)

بالنسبة لسلسة المجرات التى توجد صورها على اليمين وحيث تتم الإشــارة إلى المسافة، يمكن أن نرى على اليسار الإزاحة تجاه الأحمر الذى يحــدث لأشعة امتصاص الهيدروجين.

وتتم الإشارة إلى الإزاحة بواسطة السهم المتجه من الشمال إلى اليمين.

ونلاحظ أن سرعة الإفلات بالنسبة إلينا للمجرة المذكورة يكون متناسبا مــع مسافتها (هذا ما تقوم عليه أسس تمدد الكون حسب هابل خلال العشرينيات).

أو ^{238}U (الأورانيوم). ولقد شهدت الطريقة الأخيرة تطورات كثيرة، خاصة ما قام به كلود أليجر Claud Allegre والأمريكى جيرالد ج. واسربرج Gerald J. Wasserburg وقد حصلا معًا على جائزة كرافورد Crafoord من أكاديمية العلوم السويدية فى ١٩٨٦.

وتعطى هذه الطرائق الثلاث لتحديد الأعمار نتائج متماثلة، فيما عدا بضعة استثناءات تقترب مما يمكن تفسيره بواسطة النظريات الكونية الراهنة. وباختصار فإن الكون القابل للرصد ذو بنية. وهو نفسه فى كل مكان وهو يتمدد فعلاً.

بذلك يمكن طرح الأسئلة الكونية الآن والتصدى لها على الوجه التالى:

هل الكون فى حالة تطور،
هل له تاريخ أم أنه على العكس، لا يتغير؟

وبقول آخر، هل ظهر الزمن فى الكون بأكمله؟ كان اكتشاف تمدد الكون بواسطة إ. هابل، قد أقنع من حيث المبدأ كل علماء الفلك المعاصرين بأن للكون تاريخًا وبأنه يتطور خلال الزمن. وفى الواقع، وباستثناء القس جورجيه لاميتر Georges Lemaitre، عالم الكون البلجيكى الذى نشر فى ذلك العصر نظرية "البيضة الكونية l`oeuf cosmique" التى تماثل نظرية الانفجار العظيم، كان أغلب علماء الفلك حتى عام ١٩٦٥ يفضلون اتباع هيرمان بوندى Hermann Bondi وتوماس جولد Thomas Gold وفريد هويل Fred Hoyle. وكان هؤلاء قد قدموا فى الأربعينيات فرضية الخلق المتواصل للمادة، مما سمح بمواصلة تصور أن الكون المتطور يحتفظ مع ذلك بكثافة مادة ثابتة. وفى عام ١٩٦٥ أشار رصد بالراديو لإشعاع قديم منتشر بواسطة أرنو بينزياس Arno Penzias وروبرت ولسون Robert Wilson، وقد حصلا على جائزة نوبل للفيزياء فى ١٩٧٨، إلى أن الكون فى مجمله عبره هذا الإشعاع، المناظر لدرجة حرارة ٢,٧٣ كلفن، وقد هدم ذلك فرضية الخلق المتواصل وقدم الدليل القاطع على صحة نظرية الانفجار العظيم القائلة بأن الكون القابل للرصد شهد منذ نحو خمسة عشر مليار سنة طورًا بالغ الكثافة وبالغ السخونة تمدد ابتداء منه وبرد بالتالى (على المستوى الشامل).

وتلقى نظرية الانفجار العظيم فى الوقت الراهن نجاحًا بالغًا إذ إنها تُدخل فى حسبانها جيدًا كل اختبارات الرصد، بما فيها الأكثر حداثة مثل تلك التى نُشرت فى

الربيع الحالى نفسه، والتى نتجت عن أرصاد دقيقة حول تباين الخواص باختلاف المحور anisotropie لهذا الشعاع المنتشر بواسطة البالون الطائر الإيطالى الأمريكى "بوميرانج Boomerang". أو أيضًا من خلال أرصاد باحثين من معهد الفيزياء الفلكية فى باريس IAP – هم يانيك ملييه Yannick Mellier، برنارد فورت Bernard Fort، وفرانسيس برناردو Francis Bernareau ومساعدوهم – للتأثيرات الجاذبة على انتشار الأشعة

الضوئية المنبعثة من المجرات البعيدة جدًا. وأتاحت بعثة البالون بوميرانج رصد حالات عدم التجانس بين الإشعاع الكونى العميق المنتشر عند درجة حرارة ٢,٧٣ كلفن، بوضوح زاوى أفضل ٦٠ مرة من نظيره الذى توصل إليه المسبار الأمريكى كوب COBE (الشكل ٣) الذى أتيحت نتائجه فى ١٩٩٢ عندما كان فى استطاعته فقط التمييز بين الزوايا الأكبر من أو تساوى 7°. وبرسم تلك الخرائط لحالات عدم التجانس هذه، والتى لا تناظر حتى الآن سوى منطقة محددة من السماء، لا يقتصر الأمر فقط على تحديد قيمة الكثافة الكلية للكون ولكن أيضًا طبيعة الجسيمات التى يتكون منها (انظر لاحقًا). ومن المثير أن نعرف أن هذا التحديد يتفق جزئيًا مع النتائج التى حصل عليها الباحثون فى معهد الفيزياء الفلكية فى باريس الذين رصدوا تأثيرات لا بؤرية astigmatisme كونية أو أيضًا الانحناءات التى كابدها الضوء الخاضع لحقول الجاذبية التى يحثها وجود المادة، من جانب آخر، مع التحديدات الأخرى المستقلة لخواص حركة التمدد فى مجمله منذ رصد انفجارات السوبرنوفا من النوع "١أ"، حيث تكون قوة الإشعاع الذاتى luminosite هى نفسها بالفعل، التى تناظر فى كل حالة تفتيت كتل تساوى ^{56}Ni (نيكل٥٦) إلى ^{56}Fe (حديد٥٦) الذى يطلق دائمًا طاقات متماثلة فى الوقت نفسه. ورغم هذه النجاحات الحديثة جدًا، تعتبر نظرية الانفجار العظيم "قابلة للزوال" وقد تصبح باطلة فى المستقبل. وسيبقى مع ذلك أن الكون فى حالة تطور، وأنه ليس غير قابل للتغيير وأنه بذلك يخضع لسهم الزمان.

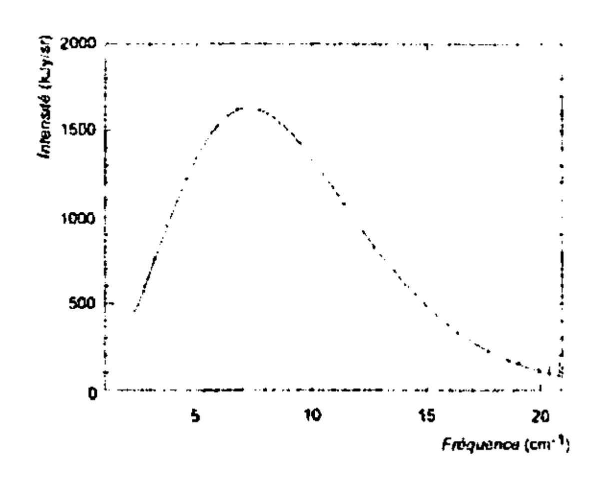
ما الذى نعرفه عن الكون؟

ما طبيعة المادة التى يتكون منها؟

هل يمكن التنبؤ بتطوره المستقبلى؟

بالنسبة لهذا النوع الثانى من الأسئلة المطروحة فإن علماء الكون مقتنعين حقًا بأن المادة النووية المرئية التى نتكون منها لا تمثل إلا جزءًا طفيفًا من المحتوى المادى للكون فى

مجمله. وبالفعل تتضمن نظرية النسبية العامة، كما أوضحها ستيفن هوكنج Stephen Hawking وروجر بينروز Roger Penrose، أن الكون بالضرورة فى حركة تمدد مستمر إذا كان له كثافة مساوية أو أقل من كثافة حرجة تساوى ٧ × ١٠ $^{-٣٠}$ جم / سم^{٣} بثابت هابل يساوى ٦٠ لكل ثانية ولكل ميجا فرسخ. وإذا كانت كثافة المادة





الشكل (٣)

نتائج قمر صناعى (١٩٩٢) عن إشعاع الراديو المنتشر.

يوضح هذا الشكل الصفة الحرارية تمامًا لأشعة الراديو المناظرة لدرجة حرارة ٢,٧ كلفن الناتجة عن التبريد بواسطة تمدد أشعة فوق بنفسجية قبل انبعاثها عند تكوين ذرات هيدروجين (أعلى)

(طيف نُشر فى جريدة الفيزياء الفلكية Astrophysical Journal فى ٢٠ ديسمبر ١٩٩٦ أعده د. ج. فيكسين D. J. Fixen، وإ. س. شينج E. S. Ching، وج. م. جاليه J. M. Gales، وج. س. ماثر J. C. Mather،

ور. أ. شـــافير R. A. Shafer، وإ. ل. رايـــت E. L. Wright. ويـــشير الجزء الثانى من الشكل إلى حالات عدم التجانس الطفيفة فى هذا الإشعاع (بنسب عدة مئات ملليمترات) والتى تُفسر بوجـــود المـــادة (تبـــع ناســـا NASA).

أعلى من هذه القيمة، فإن الكون الذى هو حاليًا فى حالة تمدد، سيشهد فيمـــا بعد طور تقلص: وسيكون سلوكه بالتالى "دوريًـــا cyclique". وبالنـــسبة لانفجـــار عظيم حدث منذ نحو عشرة مليارات سنة ووقع له تمدد، سوف يتبعـــه بـــالأحرى انسحاق عظيم عندما تصبح الكثافة الكلية للمادة أكثر ضخامة.

ثلاث فئات من الأرصاد ذُكرت فى ما تقدم:

قياس تباين الخواص باختلاف المحور للأشعة الأحفوريـــة rayonnement fossile بواسطة البالون "بوميرانج" الذى جاء بعده المسبار الفضائى كوب (الـــذى نُشرت نتائجه فى ١٩٩٢) والذى سيتبعه المسباران MAP (الأمريكـــى، الإطـــلاق المتوقع فى ٢٠٠١) وPLANK SURVEYOR (الأوروبى، الإطلاق المتوقع نحو ٢٠٠٦ - ٢٠٠٨).

- قياسات الخواص المرئية للمجرات ولركامها، ويضاف إليها تعيين تـــشكّل morphologie وهندسة البنى الضخمة للكون، التى اتضحت بوفرة هيئتهـــا غيـــر المتجانسة (وهو ما يتناقض مع التباينات شديدة الضآلة للخواص باختلاف المحـــور للإشعاع الأحفورى).

- الخواص الدقيقة لحركة تمدد الكون فى مجمله مثل أنها تظهـــر برصـــد انفجارات السوبرنوفا من النوع ١أ...، مما يتيح حاليًا وصفًا كونيًا مطابقًا بما يكفى: "ستكون نظرية الانفجار العظيم هى السيناريو المعقول فيما يتعلق بتاريخ الكـــون". وكانت لهذا الكون كثافة شاملة تساوى تمامًا الكثافة الحرجة (يرى علماء الكون أن الكون "مستو plat" وهو ما يتفق مع النماذج "التضخمية inflationnaires" (التـــى

قدمها فى بداية الثمانينيات عالم الفيزياء الأمريكى ألان جوث Alan Guth وكثير من الباحثين الآخرين) والتى تتضمن تسارعًا شديدًا لتمدد الكون فى كل أطواره المبكرة. ويعود ٧٠ فى المائة من هذه الكثافة الكلية إلى طاقة الفراغ vide (التى يحددها الثابت الكونى الذى قدمه آينشتاين Einstein فى معادلاته لديناميكية الكون المستنتجة من نظرية النسبية العامة) و٣٠ فى المائة إلى المادة الموجودة بشكل رئيسى على هيئة جسيمات غير نووية وهى الأكثر كثافة من النويات (بروتون ونوترون) ولذلك يكون الحث الحرارى فيها ضئيلاً. وعندئذ نقول إن المادة السوداء matiere sombre فى الكون قد تكون "باردة" لتفسير تشكل البنى الضخمة لهذا الكون. وعلماء فيزياء الجسيمات مسئولون عن البرهنة على وجود هذه الجسيمات! وربما يمكن لعلماء الطبيعة فى سيرن CERN، الذين ستواتيهم خلال بضعة سنوات فرصة إجراء تجارب على جهاز تصادم الهدرونات الضخم LHC، أن يرصدوا جسيم "بوزون هيجس boson de Higgs" الشهير، وهو جسيم افتراضى أيضًا ربما كان سبب الاختلاف الكبير فى الكتلة بين النويات والإلكترون. فإذا تم هذا الإنجاز، فربما يكون "بوزون هيجس" الكثيف نسبيًا، المرشح المثالى لتكوين المادة السوداء الباردة فى الكون.

ومن ثم فإن علم الكون الحديث الذى يستخدم مناهج علم الفلك ومناهج فيزياء الجسيمات يتيح حاليًا مجموعة إجابات متماسكة عن الأسئلة المتعلقة بالكون فى مجمله. وإذا قلنا إن الأرصاد الجديدة ستظل تواجه تلك التصورات والتفسيرات عن الكون، فسيظل هناك الكثير من الألغاز: العلاقات بين الكون والزمان، الوصف الكامل لمرحلة الانفجار العظيم، واحتمال وجود أكوان "مماثلة paralleles". وبالنسبة لى أحب أن أفكر فى أن أفق زمان بلانك tempsm de Plank بقيمة ١٠-٤٣ وهو ما لم ينفه أبدًا عالم الفيزياء، يرتبط غالبًا بما يفرضه جهلنا (أو بحدودنا) "بأصل" حقيقى للكون أو "خلق" للكون. لكن هناك ما يدعو بقوة إلى المراهنة على أن الإجابات عن هذه الأسئلة ستظل إلى وقت طويل خارج المجال العلمى.

المراجع:

- Audouze (J.), *L'Univers*, Que sais-je ?, PUF, n° 687, 1997.
- Bélen Barreiro (R.), *New Astronomy Review*, vol. 44, 2000, p. 179.
- De Bernadis (P.) et al., *Nature*, 404 (numéro du 27 avril 2000), p. 955 .
- Blai-nont (J.), *Le Chiffre et le songe*, Odile Jacob, 1993.
- Burrows (A.), *Nature*, 403 (numéro du 17 février 2000), p. 727 .
- Silk (J.), *Le Big bang*, Odile Jacob, 1997.

Site à consulter http://www.iap.fr/

النسبية العامة(١١)

بقلم: تيبولت دامور

Thibault DAMOUR

ترجمة: عزت عامر

ما قبل النسبية العامة

فلنسترجع أولاً مفهوم الواقع الفيزيائى فى نهاية القرن التاسع عشر. كان وصف الواقع يُدرك من خلال أربعة تصنيفات أساسية للمعانى الكلية categories، ينفصل بالطبع كل منهما عن الآخر: (١) المكان، (٢) الزمن، (٣) القوة، (٤) المادة. ويحدد المكان والزمن "نطاقات الوجود"، أى "حاوى" الواقع الفيزيائى. ويوصف "المحتوى" بأنه المادة فى حالة تطور تحت تأثير التفاعلات المعروفة باسم القوى. وكان يتم تصور المكان على أنه: ثلاثى الأبعاد، معطى بشكل سابق على التجربة، مزود بهندسة إقليدية، ويحدد مفهوم السكون المطلق. وكان الزمن: وحيد الاتجاه، معطى مسبقًا، مزودًا بهندسة إقليدية (مقياس المُدد)، ويُدرك كما لو كانت له نفس بنية الزمن النفسى، أى يتكون من "حاضر آنى"، يتدفق باستمرار بين "ماضٍ" لم يعد موجودًا و"مستقبل" لم يوجد بعد. وكان يتم إدراك القوة على أنها ناتجة عن تكوين بعض "المجالات" (المجال الجاذبى والمجال الكهرومغناطيسى)، بواسطة المادة فى كل المكان.. وكان الوصف النظرى للمجال الكهرومغناطيسى (الذى يعود إلى ماكسويل Maxwell) إنجازًا رائعًا وحَّد مفاهيم المجال الكهربائى والمجال المغناطيسى والضوء (= موجة كهرومغناطيسية). وكان وصف مجال الجاذبية (الذى يرجع إلى نيوتن Newton ولابلاس Laplace) أقل ثراء ويفترض (بطريقة غامضة) أن قوة الجاذبية تنتشر بطريقة فورية (بسرعة لانهائية). وشهد

---

(١١)نص المحاضرة رقم ١٨٣ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١ يوليو ٢٠٠٠.

وصف المادة تطورًا مستمرًا مع نهاية القرن التاسع عشر: أدمج فكرة أن الكتلة (أو "كمية المادة") ثابتة (لافوازيه Lavoisier) وأن المادة العادية تم إنتاجها من نحو ٩٠ عنصرًا كيميائيًا بسيطًا (مندليف Mendeleiev): ورغم المقاومة العنيفة، أصبحت فكرة أن المادة قابلة للتفكك فى آخر الأمر إلى "ذرات" لا تتقسم مقنعة أكثر فأكثر (بفضل الكيمياء، ولكن بشكل خاص بفضل أعمال بولتزمان Boltzmann فى مجال الديناميكا الحرارية الإحصائية). وفى ١٨٩٧ اكتشف تومسون Thomson "الإلكترون" الذى صار أول "جسيم أولى" معروف.

وفى ١٩٠٥ أتى آينشتاين (بعد إنجازات مهمة للورنتز Lorentz وبوانكاريه Poincare) بأول ثورة تصورية تخص المقولات الأربع الأساسية فى فيزياء القرن التاسع عشر، من خلال نظرية النسبية الخاصة. ولقد وحدت هذه النظرية المقولتين المنفصلتين عن المكان والزمان فى مقولة جديدة: هى الزمكان. والزمكان له أربعة أبعاد موجودة بشكل مسبق، تعتمد على هندسة بوانكاريه _ مينكوفسكى Minkowski. وهو الذى يعيّن نطاق "الوجود المتصل "existence continuee" (أى الوجود المدرك خلال كل فترته الزمنية) للواقع. و"لهندسة" (وبشكل أكثر تحديدًا "هندسة الزمن "chrono _ geometrie") بوانكريه _ مينكوفسكى زمكان ذو ٤ أبعاد ويتعين بتعميم نظرية فيثاغورس Pythagore: بالنسبة لمثلث قائم الزاوية كل أضلاعه "فى المكان" (أو "من نوع المكان") يكون مربع وتر المثلث هو مجموع مربعى ضلعى الزاوية القائمة، لكن بالنسبة لمثلث قائم الزاوية يكون أحد ضلعى الزاوية القائمة فيه ممتدًا فى اتجاه "فى الزمن" (أو "من نوع الزمن") فإن مربع وتر المثلث هو الفرق بين مربع ضلع من نوع المكان ومربع ضلع من نوع الزمن مقاسًا "بوحدة الضوء"، مثال لذلك يجب قياس الفترة الزمنية لثانية ما بالثانية الضوئية (= ٤٥٨ ٧٩٢ ٢٩٩م) قبل تجميعها مع طول ضلع مكانى. لاحظ أن الزمكان يعتبر من الناحية الأساسية تعميمًا "للرسومات البيانية للقطارات diagrammes de trains" التى كانت تُستخدم سابقًا لحل مسائل التقاء قطارات وهى تعبر الطريق نفسه، فى اتجاهات متعاكسة، وبسرعات مختلفة، بعد أن تكون

قد غادرت محطات مختلفة فى توقيتات مختلفة. وفى مثل هذا الرسم البيانى كان يتم تمثيل المكان (وحيد الاتجاه) والذى يقيس طول الطريق كمحور أفقى (المحور س x) ويتم ضمه إلى محور رأسى (ص y) يمثل مرور الزمن. عندئذ يكون المستوى (س، ص) زمكان ثنائى الأبعاد يسمح بتمثيل مسار انتقال كل قطار بواسطة خطوط متتالية. ويتم تمثيل القطار الساكن فى إحدى المحطات بخط رأسى، بينما يناظر القطار المتحرك خطًا مائلاً يعتمد ميله على سرعة القطار. حينئذ تناظر "واقعة" التقاء قطارين (افترض أنهما على طريقين متوازيين، متقاربين لكنهما متميزين!) تقاطع "خطين فى الزمكان" (ويطلق عليهما عامة "خطى الكون lignes d`univers") ويمثلان مسار حركة القطارين. وللانتقال من "الرسم البيانى للقطارات" هذا إلى الزمكان الذى افترضه آينشتاين يكفى: (١) أن نضيف من جديد بعدين آخرين مكانيين ("أفقيين")، و(٢) أن نمحو التمايز بين الاتجاهات المكانية والاتجاه الزمنى (بطمس محاور الإسناد مع عدم الاحتفاظ إلا بخطوط الكون)، و(٣) بتزويد كل زوج من نقاط _ وقائع evenements _ points فى الزمكان بمفهوم "بُعد intervalle"، أى طول (أو مربع) يماثل تعميم نظرية فيثاغورث المذكورة فى الهامش السفلى. ومفهوم "البعد" هذا هو الذى يحدد "الهندسة الزمنية" (القياس الجامع بين الفترات الزمنية والأطوال) للزمكان.(١٢)

ولقد أتى زمكان النسبية الخاصة بعدة انقلابات على التصنيف القديم للمعانى الكلية: (١) تم توحيد المكان والزمن بنبوءة التصنيف الجديد للمعنى الكلى باسم الزمكان، و(٢) تم الطعن بشدة فى مصداقية وجود "الحاضر الآنى" ("الآن")

---

(١٢)من حيث الرياضيات، بينما تؤدى نظرية فيثاغورس المألوفة، بالنسبة لمربع المسافة d بين نقطتين فى المكان الإقليدى العادى (الذى يتعين بالإحداثيات الديكارتية المتعامدة) (x، y، z) و($x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$)، إلى كتابة الصيغة $d^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2$، فإن نظرية فيثاغورس المعممة تؤدى إلى كتابة "الحد" (مربعًا) s^2 لتفصل بين واقعتين فى زمكان آينشتاين. ومربع الحد تبعًا لبوانكريه – مينكوفسكى (المتعين بالإحداثيات اللورنتزية (x, y, z, t) و $(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \Delta t)$، يُكتب على هيئة: $s^2 = d^2 - c^2(\Delta t)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - c^2(\Delta t)^2$.

باعتباره الحامل الوحيد لحقيقة الكينونة، لأنه أصبح متعارضًا مع البنية الهندسية للزمكان من حيث إختيار فئة من "سلسلة أرقام tranches" أفقية تناظر "مرور الزمن"، و(٣) خضع التصنيف القديم للمعانى الكلية الذى يفصل بين القوة والمادة لتوحيد جزئى من خلال معادلة آينشتاين المجيدة (ط = ك س٢) $E = Mc^2$ التى تطابق (بعامل رقمى س٢ جاهز، حيث س تشير إلى سرعة الضوء فى الفراغ) بين الطاقة ط (التى تشترك بالطبع مع مفهوم قوة التفاعل) والكتلة ك (التى تقيس "كمية المادة). وسوف نتحدث عن "المادة _ الطاقة" لتوضيح هذا المفهوم الجديد الذى يوحد بين ك و ط/س٢.

مفهوم مجال الزمكان

رغم الانقلابات المهمة فى مجال تصنيف المعانى الكلية التى أحدثتها نظرية النسبية الخاصة، فإن هذه النظرية لم تمس خاصية "المطلق absolu"، أى المعطى بشكل مسبق والمستقل عن المحتوى المادى، الذى وُجد، قبله، مفهوما المكان والزمان. وفى الواقع ظل زمكان آينشتاين _ بوانكريه _ مينكوفسكى (١٩٠٥ _ ١٩٠٨) إطارًا "للوجود المتصل" المعطى بطريقة مسبقة، والمزود ببنى هندسية صارمة، ظلت "هى نفسها" دائمًا وفى كل مكان، بمعزل عن وجود المادة. مثال لذلك تظل نظرية فيثاغورس المعممة صحيحة دائمًا وفى كل مكان فى الزمكان. كذلك من الممكن (بعد التعريف الملائم لمفهوم "الزاوية" فى الزمكان) صياغة نظرية طاليس Thales _ إقليدس Euclide المعممة التى تقول بأن مجموع زوايا المثلث تكون مساوية، دائمًا وفى كل مكان، 180° (= زاويتين قائمتين = π، زاوية نصف قطرية). وكان آينشتاين يدرك بشكل حدسى أن هذه الخاصية المطلقة للزمكان غير مقبولة من الناحية الفيزيائية. وكانت فكرته أنه كما يؤثر الزمكان على المادة وعلى مجالات القوة (مثال لذلك "بإجبار" جسيم حر على اتخاذ مسار "فى اتجاه مستقيم"، أى على مسار خط مستقيم وبسرعة ثابتة، فى الزمكان، و"بإجبار" مجال استاتيكى على التناقص بشكل يتناسب عكسيًا مع مربع المسافة)، لا

بد أن يكون هناك أيضًا (تبعًا للقاعدة العامة للفعل ورد الفعل) تأثير للمادة والقـوى بدورها على بنية الزمكان. ولقد استطاع صياغة هذه الفكرة الحدسية علـى شـكل رياضى بأن عمم فى حالة

زمكان رباعى الأبعاد مفهوم "المكان المنحنى espace courbe" الذى قدمـه فى القرن التاسع عشر جاوس Gauss وريمان Rieman. ويتم تعريـف الزمكـان المنحنى على أنه بنية ذات أربعة أبعاد، لها فى كل "منطقة" صغيرة من الزمكـان (أى بالقرب من كل واقعة) البنية الهندسية نفسها لزمكان بوانكريه _ مينكوفـسكى. وبقول آخر، يمكن، مثلاً، توقع أن تكون نظرية فيثـاغورس ونظريـة طـاليس _ إقليدس صحيحتين (تقريبًا) بالنسبة لأى مثلث صغير بما فيه الكفاية، أيًا كان موقعه فى الزمكان. ومن ثم يماثل هذا الزمكان المنحنى، محليًا، قطعة صغيرة من زمكان بوانكريه _ مينكوفسكى (الذى يطلق عليه الآن " الزمكـان المـسطح _ Espace Temps Plat")، بنفس طريقة التماثل بين سطح منحنٍ فى المكان الإقليدى المألوف (مثل سطح كرة) بشكل محلى مع قطعة صغيرة من سطح (وفـى الواقـع، يمكـن بالقرب من كل نقطة P التحديد التقريبى لقطعة صغيرة من سطح منحنٍ على قطعة صغيرة من سطح مماس عند P على السطح). عندئذ يمكن تحديد تعريف "الانحناء Courbure" على أنه القياس المحلى للفرق المتبقى بين الهندسة (المسطحة تقريبًـا) بالقرب من نقطة ما والهندسة الإقليدية المألوفة. مثال لذلك، يمكـن اسـتخدام مـا يخرق نظرية طاليس _ إقليدس لتعريف مفهوم الانحناء. يتم تعريف قيمة الانحنـاء (المتوسطة) C للمكان في مثلث صغير (زواياه α وβ وγ) على أنها قيمة محدودة (عندما يصبح المثلث بالغ الصغر) للنسبة δ/ A بين الـسطح A المتـضمن فـى المثلث والفرق بين مجموع الزوايا وقائمتين δ = α + β + α − π. ويمتـد هـذا التعريف فى حالة انحناء الزمكان باستخدام تعميم مفهـوم الزاويـة فـى هندسـة الزمكان. ومن المهم ملاحظة أن مفهوم الانحناء C للزمكان يوجد متعينًـا كـذلك فحسب انطلاقًا من الكميات التى يمكن قياسها فى الزمكان. لذلك يمكن (بل ويجب) تصور "الانحناء" C للزمكان بطريقة داخلية تمامًـا، دون أن نتخيـل أن زمكاننـا

رباعى الأبعاد هو نوع من انحناء سطح مفرط يغوص فى الزمكان المسطح فى ٥ أبعاد أو أكثر. ولإعطاء مثال واقعى، يمكن قياس انحناء الزمكان فـى مجموعتنـا الشمسية بتصور رسم مثلث زمكان يتكون من خطوط "مستقيمة" تربط بين ثـلاث وقائع أ، و ب، و ج، حيث، مثلاً، أ و ب واقعتان (منفصلتان زمنيًـا) علـى خـط زمكانى محدد بحركة الأرض، وحيث ج (الرأس الثالث للمثلث) واقعة (على خـط الزمكان المحدد بحركة المريخ) تناظر وصول شعاع ضوئى إلى المريخ منبعث من أ من الأرض، وتبعه إعادة بث مباشر (بواسطة جهاز استقبال /جهاز إعادة إرسال) لشعاع ضوئى يتجه إلى الأرض (متقاطعًا مع خط زمكان الأرض فى ب). يمكـن البرهنة على أن الأضلاع الثلاثة للمثلث أ ب ج متحققة فيزيائيًا مثل الأجزاء الثلاثة للخطوط "المستقيمة" ("الجيوديزية")(١٣) التالية: يتطابق الضلع أ ب مع قطعـة مـن خط كون الأرض، بينما الضلعان أ ج و ج ب مرسومان فى الزمكـان بواسـطة شعاعى الضوء المتبادلين بين الأرض والمريخ. وليس هناك ما يمنع بشكل مـسبق إثبات أن مجموع $\alpha + \beta + \alpha$ لزوايا هذا المثلـث الزمكـانى يـساوى π عـدديًا. وبالفعل أوضحت التجربة (أو بشكل أكثر دقة التفسير النظـرى لتجـارب أخـرى أجريت "برسم"، بواسطة أشعة ضوئية، أشكال أكثر تعقيدًا من المثلثات بين خطوط زمكان الأرض والمريخ) أن الفرق $\delta = \alpha + \beta + \alpha - \pi$ كان "غير ممكن إهماله" وتصل قيمته إلى مائة جزء من مليون (10^{-8}).

وتتيح نظرية النسبية العامة لآينشتاين فهم هذا الأمر (الذى سبق أن تنبـأت به). والمسلمة الأساسية فى هذه النظرية أن كل وجود للكتلة - الطاقة فى الزمكان يؤثر على هندسته الزمنية و"يغير شكلها" من حالتها "الساكنة" (الهندسـة الزمنيـة لبوانكريه مينكوفسكى) وتكون قابلة للتطبيق فى الزمكان الخالى من المادة، حتـى حالة "الانحناء"، أى حالة الهندسة الزمنية حيث لا يكون الانحناء قـابلاً للإهمـال. وبشكل أكثر دقة، لقد طرح آينشتاين مسلمة تعتبر قيدًا كميًا محـددًا يـشير بـشكل

(١٣)جيوديزية geodesique: الخط الجيوديزى هو أقصر خط بين نقطتين على سطح معين. (المترجم)

أساسى إلى أنه فى كل نقطة P فى الزمكان يكون الانحناء $C = \delta / A$ للزمكان القريب من P، مساويًا (فى المتوسط وبمعامل رقمى تقريبى، $k \equiv G/c^2$ حيث G ثابت الجاذبية) مع كثافة حجمية ρ للكتلة – الطاقة عند P (ρ = الكتلة – الطاقة / الحجم). وتحدد معادلة آينشتاين هذه $C = k\rho$، بشكل كامل نظرية النسبية العامة. (تتضمن الصياغة التقنية المعتادة لنظرية آينشتاين أشياء رياضية أكثر تعقيدًا "كميات ممتدة[١٤] tenseurs"، لكنها فى الواقع متكافئة مع هذه الصياغة المبسطة، إذا أخذنا فى الاعتبار متوسطات "سلاسل الأرقام المكانية" للزمكان)[١٥].

وتعتبر النقطة الأكثر أهمية من الناحية التصورية هى أن النسبية العامة تنجز كذلك توحيدًا فى قلب التصنيفات الأربعة الكلية القديمة المنفصلة. وبالفعل لقد فقدت هندسة زمن الزمكان خاصيتها المطلقة و"المتصلبة" لكى تصبح بنية "مطاطة" (أو "مرنة") تتأثر (وبشكل محدد "تتحنى") تحت تأثير وجود الكتلة – الطاقة (أى المادة و / أو القوة). وفى الفيزياء، فإن كل بنية تتوزع فى كل المكان والزمان وقد تتحول و / أو تنشأ عن وجود المادة، يُطلق عليها، بشكل عام، "مجالاً". ومن ثم فإن نظرية آينشتاين تبرهن على أن هندسة زمان الزمكان تُعتبر "مجالاً" متحولاً بكل وجود الكتلة – الطاقة.[١٦] وفى "مجال هندسة الزمن للزمكان الناشئ عن وجود

---

(١٤)كمية ممتدة tenseur: تعميم مُتَّجِه إلى مصفوفة مُركَّبات فى بعدين فضائيين أو أكثر. (المترجم)

(١٥)ولتوضيحها استخدم هنا الأمرين التاليين: (١) الكمية الممتدة لأينشتاين Eμv = Rμv - ½Rgμv يتم الحصول عليها بالطبع عندما نلاحظ أن متوسط الانحناء التجزيئى (من جاوس Gauss، k = C) فى مجموعة من مستويين متعامدين فى اتجاه معين (موحد) uμ للزمكان يكون متناسبًا مع المركبة uv uμ Eμv = Eμv للكمية الممتدة لأينشتاين على طول uμ. و(٢) المعادلة المتعلقة بالكمية الممتدة لأينشتاين Eμv = 8 πGc-4 Tμv تتكافأ فرضًا مع المعادلة العددية scalaire Eμv = 8 πGc-2 ρ μ حيث c2 / ρ μ = Tμv u μ uv وكثافة الكتلة – الطاقة فى المكان الثلاثى المتعامد على u μ) بالنسبة لمجموعة مناسبة من الاتجاهات المختلفة (من نوع الزمن، u v g μv u μ = -1).

(١٦)ومن جانب الرياضيات، فإن القياسين المحليين للفترات الزمنية dT والطول dL متضمنة فى البُعد ds2 = dL2 - c2 dT2 بين واقعتين متجاورتين إلى أقصى حد فى الزمكان (تتعينان بالإحداثين المحددين (x0 = ct, x1 = x, x2 = y, x3 = 2) و(x0 + dx0, x1 + dx1, x2 + dx2, x3 + dx3) ويتم الحصول على هذا البعد المربع بصيغة تربيعية ∑3v=0 ∑3μ=0 ds2 = g μv (xλ)dxμ dxv حيث إلمعاملات..

الكتلة – الطاقة" هذا، توجد التصنيفات الأربعة للمكان والزمن والقوة والمادة موحدة. وفى الواقع فإن "مجال الزمكان" (للاختصار) هذا يحقق أيضًا توحيدًا آخر. ولقد أوضح أينشتاين بالفعل أن نظريته عن "مجال الزمكان" تتضمن، فى تقريبها الأول، النظرية القديمة لنيوتن _ لابلاس عن "مجال الجاذبية". وكان نيوتن قد تصور الجاذبية على أنها قوة ناتجة، مثلاً، عن وجود الشمس التى تحرف بدون توقف كوكبًا عن مساره الكونى "الطبيعى" ليصبح خطًا مستقيمًا فى الزمكان المسطح (أى خطًا مستقيمًا مقطوعًا بسرعة ثابتة). وبالعكس تصور آينشتاين الجاذبية على أنها حركة "طبيعية" تتبع الخطوط الأكثر استقامة بقدر الإمكان فى الزمكان "المشوه" ("المنحنى") بسبب وجود الكتلة – الطاقة فى الشمس.

الزمكان المرن

فللنظر عن قرب أكثر إلى المفهوم الآينشتاينى الجديد لمجال الزمكان المتماثل مع المجال الجاذبى. والفكرة الأساسية أن بنية الهندسة الزمنية للزمكان (أى البنية التى تضم كل المقاييس الممكنة للأزمنة والمسافات) لم تعد بنية متصلبة، معطاة بشكل مسبق، مرة واحدة وإلى الأبد، لكنها أصبحت مجالاً، أى بنية "مطاطة"، أو "مرنة"، نشأت و / أو تغير شكلها بوجود كثافة حجمية للكتلة – الطاقة ($C = k\rho$). ويصف مجال الزمكان هذا فى الوقت نفسه التغيُّر التام للهندسة الزمنية وكل التأثيرات الجاذبة (مثل تأثير الأرض من على بعد على التفاحة، أو الأرض على القمر، أو الشمس على الأرض).

والمثال الأكثر بساطة عن "مرونة" الهندسة الزمنية للزمكان هو تأثير تقاربية الكتلة على "سرعة المرور المحلى للزمن". وبتعبير واقعى، إذا فصلت

=(xλ) g μν، المتغيرة من نقطة إلى أخرى، تعيّن "مجال الهندسة الزمنية" (الكمية الممتدة المترية). و"يشوه" وجود المادة $\rho \neq 0$ من حالة "سكونها" المينكوفسكى، حيث يتم الحصول على $g^{(0)}_{\mu\nu}(x\lambda)$ (xλ) بمصفوفة قطرية ثابتة، مع – ١، +١، +١، +١ فى القطر.

توأمين عند مولدهما، بحيث يبقى أحدهما على سطح الأرض ويذهب الآخر ليعيش على قمة جبل شاهق الارتفاع (أى أكثر بعدًا عن مركز الأرض)، ثم جمعت بينهما بعد ١٠٠ سنة، فإن التوأم "الجبلى" سيكون أكثر شيخوخة (حيث إنه عاش عمرًا أطول) من التوأم الذى ظل موجودًا على اليابسة. ويبدو الأمر كما لو أن الزمن قد مر مسرعًا بقدر ما أسرع مما لو كان المرء أكثر قربًا من توزيع الكتلة - الطاقة.(١٧)

وهناك تنبؤ آخر مرموق لنظرية آينشتاين، يوضح خاصية "مرونة" الزمكان ووجود "موجات تغير شكل ondes de deformation" للهندسة الزمانية. ويمكن الإشارة إلى أنه انطلاقًا من المعادلة الأساسية $C = k\,\rho$ فإن تغيرًا محليًا لتوزيع المادة _ الطاقة ρ لا يسبب فقط تغيرًا فى انحناء الزمكان C عند النقطة نفسها (فى الزمكان، أى فى النقطة نفسها فى المكان وفى الزمن نفسه)، لكنه يسبب أيضًا تغيرًا مرتبطًا بانحناء الزمكان فى موضع آخر فى الزمكان. وفى الواقع، كما هو الأمر بالنسبة لكل مجال فيزيائى، ينشأ عن تغير شكل مصدر هذا المجال "اضطراب ebranlement" ("تحريك" المجال) ينتشر إلى مسافة بعيدة، ابتداء من المصدر، فى كل الاتجاهات. وبقول آخر، فإن الاختلاف المحلى فى توزيع المادة - الطاقة تنشأ عنه "موجة تغير شكل الزمكان" تنتشر فى الزمكان. ويمكن بذلك تصور الزمكان على أنه بنية "مرنة" تنتشر فيها تغيرات الشكل المحلية إلى مسافة بعيدة على هيئة موجات. ويُلاحظ أن موجات تغير شكل الزمكان هذه تنتشر بنفس سرعة موجات تغير شكل المجال الكهرومغناطيسى (أى بسرعة الضوء c التى

---

(١٧) بمصطلحات الرياضيات، فإن المعامل g00(x) الذى يقيس التوقيت (انظر الملاحظة السابقة) قد تغير مقارنة بقيمته المعتادة gooMunkowski = - cn g00 (x) = - 1 + 2GM/c2r حيث G هو ثابت (نيوتن) للجاذبية، و M كتلة الأرض و r المسافة إلى مركز الأرض. وفى المثال التوأمين يكون التأثير بالغ الصغر (اختلاف فى العمر يصل إلى نحو ثانية واحدة فى ١٠٠ عام)، لكن تم التحقق منه عدة مرات بمقارنة ساعات ذرية. وسوف نرى بعد قليل أن هذا التأثير الذى يُطلق عليه "أينشتاين" له حاليًا عوائد عملية مهمة لا يجب إغفالها (نظام الملاحة العالمى GPS).

تساوى ٤٥٨ ٧٩٢ ٢٩٩ مترًا فى الثانية).[١٨] وبسبب التماثل بين مجال الزمكان والمجال الجاذبى يُطلق على هذه الموجات أيضًا "موجات جاذبة ondes gravitationnelles". ومثال لذلك، إذا كان هناك نجمان (أى كرتان تحتوى كل منهما على توزيع حجمى للكتلة _ الطاقة) يدوران كل منهما حول الآخر، فإنه ينشأ عن حركتيهما تغيير فى شكل الهندسة الزمانية ينتشر إلى مسافة بعيدة (ويقل متناسبًا بشكل عكسى مع المسافة). ولم يتم بعد كشف هذا النوع من تغير شكل موجات الزمكان، لكن هناك مشروعات طموحة تحت التأسيس (خاصة كاشفان[١٩] فى الولايات المتحدة، المشروع LIGO، والكاشف الفرنسى الإيطالى بالقرب من باريس، المشروع VIRGO) لرصدها. والفكرة الأساسية فى كشفها أن تُقاس، بشكل مستمر، بواسطة التداخل الضوئى interferometrie، هندسة المثلثات الصغيرة للزمكان على الأرض (حيث يكون ضلعان شعاعين ضوئيين وحيث يكون الضلع الثالث على خط زمكان مرآة جهاز فصل separateur) وانتظار اضطراب هذه الهندسة بمرور موجة تغيير شكل الهندسة الزمانية. (وبتعبيرات أقل دقة لكنها أكثر بساطة فإنه عوضًا عن قياس الضوء، يتم قياس المسافة بين عدة مرايا والانتظار حتى يحدث تغير فى الشكل قد يغير هذه المسافة). وتتوافر الثقة فى وجود هذه الموجات لأن الدراسة التجريبية والنظرية، التى توفق بين الحركة المدارية لبعض المنظومات الثنائية للنجوم الهامدة (ثنائيات النجوم النابضة[٢٠]) تتيح التحقق بدقة عالية من واقعة أن التفاعل الجاذبى بين النجمين ينتشر، من أحدهما إلى الآخر، بالضبط بالخواص التى تنبأت بها نظرية آينشتاين، وبشكل خاص أن

---

(١٨)بالنسبة لوسط مرن عادى (مثل الوسط الصلب، مثال لذلك كتلة معدنية) تزداد سرعة انتشار الموجات المرنة مع زيادة صلابة المادة الصلبة. فإذا قارنا السرعة c التى تساوى ٤٥٨ ٧٩٢ ٢٩٩ مترًا فى الثانية للموجات المرنة للزمكان بسرعة v = ٣٠٠٠ متر فى الثانية للموجات المرنة فى مادة صلبة نموذجية سوف نأخذ فى اعتبارنا أن المكان بنية شديدة الصلابة!

(١٩)كاشف detecteur: أداة للكشف عن الموجات الكهربائية أو النشاط الإشعاعى. (المترجم)

(٢٠)بولسار pulsar: نجم نابض يبعث بنبضات راديوية منتظمة سريعة، أو نبع إشعاع راديو فلكى، أى جرم سماوى يُعتقد بأنه نجم نيوترونى يصدر انفجارًا قويًا ومنتظمًا من الأمواج الإشعاعية. (المترجم)

سرعة انتشارها تساوى إلى حد بعيد (بما هو أكثر من جزء من الألف) سرعة الضوء c.

والتنبؤ الثالث البارز للزمكان المرن لآينشتاين هو احتمال النشوء المستمر للمكان. وهو مفهوم "تمدد المكان" ويمكن لهذا النوع من الزمكان أن "يؤثث" بواسطة مجموعة (لانهائية) من الراصدين حيث يكون السلوك النسبى غير عادى: كل راصد (الذى يتتبع خط كونه ويلاحظ الراصدين الآخرين بتبادل الأشعة الضوئية) يجد، عند قياس السرعة النسبية، بواسطة ظاهرة دوبلر effet Doppler، للراصدين الآخرين، أن الراصدين فى جواره المباشر فى كل لحظة فى حالة "سكون" مقارنة به (السرعة النسبية تكون شبه منعدمة). ومن ثم فإنه يوجد فى موقف يشبه سائق سيارة مأسورًا فى ازدحام مرورى ضخم، حيث يكون كل جيرانه فى حالة سكون بالنسبة إليه. لاحظ جيدًا أن موقف السكون النسبى المحلى هذا هو موقف حقيقى لكل الراصدين: فبالنسبة لكل راصد لا شىء يتحرك من حوله. ومع ذلك، فإن المسافة بين راصدين (تفصل بينهما مسافة محدودة ومتناهية الصغر أيضًا) تكون دائمًا، فى مثل هذا الزمكان، آخذة فى الزيادة بمرور الزمن. لذلك ينتهى أمر إجمالى المسافات النسبية إلى الزيادة، حتى لو أن "لا شىء يتحرك" فى أى لحظة وفى أى مكان، محليًا. ويذكِّرنا هذا الموقف برحلة "بارسيفال Parsifal" لفاجنر Wagner، حيث يندهش الشاب بارسيفال عندما يرى نفسه يقطع مسافات دون سير وحيث يقول له جورنيمانز Gurnemanz الشيخ "هنا يا بنى الزمن يُنشئ المكان". وهو نفس ما يحدث فى الزمكان الذى يكون فى حالة تمدد، حيث يُنشئ "مرور الزمن" البسيط فواصل مكانية أكثر فأكثر اتساعًا، فى غياب السرعات النسبية المحلية القابلة للقياس. ومن أعظم الاكتشافات فى القرن العشرين اكتشاف حقيقة أن كوننا على المقياس الكبير يمكن وصفه جيدًا بهذا الزمكان المتمدد (وهو الوصف الذى قدَّمه فريدمان Friedmann فى ١٩٢٢). ويبدأ مثل هذا الزمكان بالضرورة بحالة يكون فيها كل الزمكان مليئًا بغاز بالغ الحرارة وبالغ الكثافة (مفهوم "الانفجار العظيم الساخن" الذى قدمه جامو Gamow فى

الأربعينيات). وتأكدت صحة هذا النموذج للانفجار العظيم الساخن بواسطة عدد كبير من المعطيات الرصدية. وتشير هذه المعطيات إلى أن كل المكان كان قد وصل فى الماضى إلى درجات حرارة تتجاوز مليار درجة. مع ذلك يبقى تفسير سبب ظهور الكون وكيفية ظهوره، فى ماضيه وبتلك الحالة.

وهناك تنبؤ رابع بارز دفع بمفهوم آينشتاين عن الزمكان المرن إلى أقصى مداه ويتمثل فى مفهوم الثقب الأسود (الذى قدَّمه أوبنهايمر Oppenheimer فى نهاية الثلاثينيات). نفترض وجود كرة من المادة لا يوجد ضغط داخلها (أو حيث الضغط الداخلى غير كاف لمنع انهيارها). مثال لذلك، يمكن أن نتخيل كرة مملوءة بشكل منتظم بمادة باردة، تتحول إلى غبار. تبعًا لنظرية نيوتن، فإن الشد الذاتى الجاذبى لهذه الكرة من الغبار سوف يؤدى إلى انهيارها على نفسها، حتى تصبح نقطة ذات كثافة لانهائية فى المكان. وتبعًا لنظرية آينشتاين، يحدث شيء مختلف تمامًا. فمع الانهيار، وبالتالى مع ارتفاع الكثافة، يتغير محليًا شكل بنية الهندسة الزمنية لزمكان بكرة الغبار أكثر فأكثر (طبقًا لمعادلة آينشتاين $C = k\rho$). وبالإضافة إلى ذلك يتحرك هذا التغير فى الشكل بنفسه فى الزمكان. عندئذ يُشار إلى أنه بسبب هذا التغير المتنامى فى الشكل، يحدُث شيئان مختلفان: (١) ينشأ فى الزمكان حول الكرة وفى مستقبلها، منطقة من الزمكان حيث تكون الهندسة الزمنية على درجة من الاختلاف عن الهندسة الزمنية لبوانكريه _ مينكوفسكى، حتى إن الأشعة الضوئية، وهى مستمرة كلها فى الانتقال محليًا "بسرعة الضوء" c، لا تصل بعد إلى الإفلات ولا الانطلاق نحو اللانهاية، لكنها تظل إلى الأبد "واقعة فى فخ الموضع" بواسطة هذه البنية الزمكانية التى تغير شكلها (مفهوم "سطح الثقب الأسود" حيث لا يستطيع الضوء أن يخرج). و(٢) وفى اتجاه نهاية هذه البنية (فى اتجاه الزمكان حيث تواصل الكرة انهيارها) ينشأ عن انهيار الكرة "انسحاق عظيم big crunch"، أى العكس الزمنى للانفجار العظيم big bang. ويعتبر الانسحاق العظيم "نهاية الأزمنة" حيث يكفُّ كل المكان الداخلى للثقب الأسود عن الوجود "فى الوقت نفسه" بعد انتهاء زمن تغيُّر متناه (يعتبر بشكل عام مختصرًا جدًا: فمثلاً

بالنسبة لنجم تصل كتلته إلى عدة كتل شمسية يحدث له انهيار، تصل نهاية الأزمنة خلال جزء من مليون من الثانية). وأخيرًا، فإن للثقب الأسود هيئة ثلاثية: (أ) إذا نُظر إليه من الخارج فإنه يكون مركزًا للشد الجاذبي الذى حافظ على كل التأثير الجاذبى للكتلة – الطاقة التى انهارت. (ب) إذا نظرنا إليه من السطح نجده كرة حيث يكون الضوء فائضًا (وهنا عكس جملة جورنيمانز: يتحرك الضوء بأكثر سرعة ممكنة، لكن لا يمكنه الانتقال). و(ج) بالنظر إليه من الداخل فإنه يمثل النهاية السريعة جدًا للزمن المتعلقة بمكان له حجم لانهائى، مع أنه يستمر فى كرة ذات نصف قطر متناه! وليس لدينا بعدُ برهان رصدى مطلق إلا تلك الأجرام الموجودة فى كوننا، التى توضح بطريقة مثيرة الخاصية المرنة (حتى التمزق فى الانسحاق العظيم) لزمكان آينشتاين. ومع ذلك فإن الكثير من الإشارات غير المباشرة توضح أن عددًا بالغ الضخامة من الثقوب السوداء يوجد فى الكون، بل وتتكون أيضًا بشكل مستمر عند انهيار النجوم الأكثر ضخامة. وأول دليل رصدى لا جدال فيه على وجود الثقوب السوداء يجب توقعه بدون شك من رصد موجات تغير شكل الزمكان (موجات جاذبة ondes gravitationnelles) الناشئة عند تكوُّن ثقب أسود نتيجة اندماج نجمين هامدين.

حاضر النسبية العامة ومستقبلها

فلنحدد بدقة أولاً أن نظرية النسبية العامة، التى ظلت إلى وقت طويل بنية عقلية جميلة ينقصها الارتباط بالواقع والبرهنة التجريبية، هى حاليًا نظرية بالغة الحيوية، متفاعلة مع الواقع وتمت البرهنة على صحتها بالكثير من التجارب عالية الدقة. وهناك إثباتات تجريبية لصحة نظرية آينشتاين فى كثير من المجالات: (أ) أثبتت عدة تجارب أُجريت فى المجموعة الشمسية (ساعات ذرية، وحركات كواكب، وانحراف الضوء، والإعاقة الجاذبة لموجات الرادار، وصدى الليزر على القمر....) بدقة (تصل إلى أكثر من ٠,١ فى المائة)، أن نظام "ما بعد النيوتنية" عن تغيرات الشكل الضعيفة فى الزمكان كان قد تم وصفها بواسطة النسبية العامة،

(ب) أتاح أيضًا قياس توقيت دقة بعض النجوم النابضة الثنائية (حتى ٠,٣ في المائة تقريبًا) إثبات حقيقة أن تغيرات شكل الزمكان تنتشر بسرعة الضوء، وأن نظرية آينشتاين توضح بشكل صحيح تغيرات الشكل القوية للزمكان التي تهيمن على سطح النجم النيوتروني، وأخيرًا (ج) لا يمكن فهم وتفسير المعطيات الكونية في مجملها إلا في إطار هذه النظرية.

من المهم أن ندرك أن غالبية الاختبارات التجريبية المذكورة سابقًا ليست إثباتات نوعية بسيطة لحقيقة أن نظرية آينشتاين تنجح أكثر من نظرية نيوتن في تفسير الجاذبية. إنها قياسات عالية الدقة تتعلق بالتنبؤات بالغة الوضوح، وبعيدة الغور في الوقت نفسه من الناحية الكيفية، التي تم الحصول عليها بعد مجهودات تجريبية ونظرية ضخمة. وفي الواقع فإن نظرية آينشتاين تعتبر إحدى النظريات الفيزيائية التي تحققت على أفضل ما يكون وأصبح لدى علماء الفيزياء يقين بأنها حلت بشكل نهائي محل كل المحاولات الأخرى (التي حازت التقدير حتى الوقت الراهن) في الوصف النظري للجاذبية، وأنها تجعلنا نصل إلى مستوى جديد من وصف الزمكان والجاذبية وفهمهما. ويضاف إلى ذلك، أن هذه النظرية تعتبر في الوقت الحالي جزءًا متممًا لمجمل التقنيات المتقدمة من حيث إن لها كثيرًا من التطبيقات العلمية أو العملية. فقط فلنأخذ مثالاً لذلك: نظام تحديد المواقع العالمي GPS. يتعلق الأمر بمجموعة أقمار صناعية تدور حول الأرض وتحمل ساعات ذرية ذات توازن عالٍ، وتبث إشارات كهرومغناطيسية. وعند تنظيم المعلومات التي تم استقبالها من عدة أقمار صناعية (والتي تنقل بشكل خاص "الزمن الصحيح" الذي تشير إليه الساعة على متن القمر الصناعي) يمكن لراصد أن يحدد بدقة موقعه في الزمكان، أيًا كان موقعه (على الأرض أو في الفضاء)، وأيًا كان الوقت. وأصبح لنظام تحديد المواقع هذا (الذي استخدمه الجيش الأمريكي) المزيد والمزيد من التطبيقات العملية المهمة: مثل الملاحة الجوية والبحرية، أو حتى بالنسبة "لملاحة" السيارات الخاصة. ومن الجدير بالملاحظة معرفة أن وصف آينشتاين لتغير شكل الزمكان بكتلة الأرض يلعب دورًا مهما في إدارة عمليات نظام تحديد

المواقع: بالفعل تقول لنا نظرية آينشتاين إن "سرعة مرور الزمن" (بالنسبة لنظام إسناد ساكن كليًا) يختلف على ارتفاع القمر الصناعى وعلى الأرض. ويكون هذا التأثير جزءًا من المليون فقط (وذلك ينتج مباشرة من المعادلة $C = k \rho$، لكن إذا لم نأخذه فى الاعتبار ينتج عنه خلل كبير فى العمل غير مقبول (ويزداد بشكل متواصل مع الزمن) فى نظام تحديد المواقع العالمى (وبالفعل تستند نتائج أداء هذا النظام على الاتزان العالى للساعات المحمولة على الأقمار الصناعية، بنسبة أفضلية ١٠ -١٣، أى اتزان أفضل ١٠٠٠٠ مرة من التغير الظاهرى للتردد (~ ١٠ -٩) الناجم عن تغير شكل الهندسة الزمنية).

ومع أن نظرية آينشتاين تعتبر من النظريات التى حصلت على أفضل إثبات فيزيائى، يواصل العلماء ابتكار وتخطيط تجارب جديدة، أو أكثر وضوحًا أيضًا، لهذه النظرية، ومثال لذلك أن ناسا NASA تعمل على تجهيز مهمة فضائية ("مسبار الجاذبية Probe B" أو "بعثة الجاذبية Relativity Mission") هدفها الرصد، الأكثر مباشرة بقدر الإمكان، لتنبؤ خاص بالنسبية العامة يرى (بشكل حدسى) أن المكان ليس "مرنًا

elastique" فقط لكنه "مائع fluide" أيضًا. وفى القرن العشرين، كان فوكو Foucault قد ابتكر فى الوقت نفسه الجيروسكوب وبندوله الشهير لكى يصل، بواسطة تجارب لاقت ضجة كبيرة، إلى أن المكان كان "جاسئًا rigide" (المكان المطلق لنيوتن)، بحيث إن الجيروسكوب أو البندول يواصل، بشكل محلى على الأرض، ورغم دوران الأرض، "محاولة" اتخاذ اتجاه "ثابت" (أو مستوى ثابت) فى "المكان الجاسئ المطلق". فى حين أن نظرية آينشتاين توضح أن المكان ليس جاسئًا تمامًا. وتوصلت الحسابات (تبعًا للمعادلة $C = k \rho$) إلى حقيقة أن الأرض التى تعتبر كرة من المادة فى حالة دوران تتسبب فى تغير خاص فى شكل الهندسة الزمنية للزمكان حول الأرض، وهو ما يشبه تأثير "جذب فى حالة الدوران" أكثر من تشابهه مع كرة من المادة تدور فى وسط مائع (أو بشكل أكثر بساطة ملعقة

تدور فى حساء!): "يجذب" دوران الأرض، بطريقة طفيفة، كل المكان حولها بأن "يدور" كما قد يفعل المائع. وينتقل "دوران المكان" هذا، بطريقة ملحوظة، بخرق تأثيرات قدمها فوكو: وبشكل خاص لا يتخذ الجيروسكوب بعد ذلك اتجاهًا "ثابتًا فى المكان المطلق"، لكنه يتطابق فى كل الأوقات مع اتجاه "منجذب"، محليًا، بحركة دوران المكان (الذى يعتبر بدوره "منجذبًا"، من على بعد هذه المرة، بدوران الأرض). ويعتبر هذا التأثير طفيفًا جدًا، لكن قد يمكن رصده فى ٢٠٠١. وعقليًا سوف يصبح هذا الرصد مهمًا (مثل ما حدث لبندول فوكو) ليضع فى وعى عدد كبير من الناس أحد الجوانب البارزة للمفهوم الجديد لآينشتاين حول زمكان يمكن أن يتغير شكله.

إذا ألقينا نظرة أكثر بعدًا فى المستقبل، يبدو أن مستقبل النسبية العامة سيكون خصبًا. أولاً، مازالت هناك المهمة الحاسمة بخصوص التحقق المباشر من تنبؤين (تمت مناقشتهما سابقًا) هما الأكثر جدة فى النظرية: (١) وجود الموجات الجاذبة، أى موجات تغير شكل المكان، والتى تصل إلى الأرض بعد بثها، منذ زمن بعيد جدًا، من مصادر فيزياء فلكية نائية. و(٢) وجود الثقوب السوداء. يحدونا الأمل فى أن تتوصل كاشفات الإدخال[٢١] العملاقة (لها أذرع طولها عدة كيلومترات) وتُنشأ حاليًا فى العالم (خاصة المشروع الفرنسى الإيطالى VIRGO)، وستأتى فى بضعة سنوات ببراهين مقنعة حول (١) و(٢). وهناك نوع آخر من المشاكل الضخمة، حيث تلعب النسبية العامة دورًا حاسمًا، يتعلق بعلم الكون، خاصة علم الكون الأولى. وهنا أيضًا، خاصة بفضل البعثات الفضائية، نأمل أن نرى خلال السنوات المقبلة بعثة غنية بالمعطيات الرصدية. وها هى مجرد بضعة كلمات رئيسية: (١) مشكلة "المادة السوداء" (يبدو أن نحو ٩٠ فى المائة من المادة الوزنية ponderale الموزعة فى الكون من غير المادة العادية (مثل البروتونات، النيوترونات، والإلكترونات) لكن من نوع آخر من الجسيمات). (٢) مشكلة "كتلة _

---

(٢١) المدخال interferometer: آلة قياس بواسطة التداخل الضوئى. (المترجم)

طاقة الفراغ" (يبدو أن نحو ٧٠ فى المائة من الكثافة المتوسطة للكتلة _ الطاقة ρ فى الكون ليست من المادة الوزنية (أى تبعًا إلى (١)، خاصة الجسيمات التى لم تُرصد بعد كمادة سوداء)[٢٢] لكن لا بد أنها مرتبطة بالخواص الكمية "للفراغ" (أى المكان الخالص، فى غياب الجسيمات الحقيقية). (٣) مشكلة "مصدر الانفجار العظيم"، سبب وكيفية أن ماضى الكون قابل للوصف، بدقة عالية، بأنه حالة غاز متمدد بالغ السخونة والكثافة يملأ الكون كله؟).[٢٣]

ما بعد آينشتاين

وأخيرًا، علينا أن نلاحظ أن أحد التحديات الضخمة التى تواجه بالفعل الفيزياء الأساسية حاليًا هو التوافق بين المفهومين الثوريين العظيمين فى القرن العشرين: النسبية العامة من جانب (العائدة إلى آينشتاين ١٩١٥) والنظرية الكمية (العائدة إلى هيزنبرج Heisenberg، وبور Born، وجوردان Jordan، وشرودنجر Schrodinger، وديراك Dirac وآخرين فى ١٩٢٥ _ ١٩٢٦). وتم تطوير النظرية الكمية خلال القرن العشرين كله وكشفت عن أنها الإطار الضرورى للوصف الدقيق للمادة والقوى التى تتفاعل معها. وفى الحقيقة فإن النظرية الكمية تحمل هى أيضًا، مستقلة عن النسبية العامة، انقلابات عميقة فى التصنيفات الأساسية القديمة للمعانى الكلية فى فيزياء القرن التاسع عشر. وليس هذا موضع

---

(٢٢) حتى لا يحدث لبس بين (١) و(٢)، نوضح أن الأمر يبدو حاليًا أنه من المحتمل أن الكثافة الكلية (المتوسطة) للكتلة – الطاقة الموزعة فى الفضاء الكونى تتكون من: $\rho_{totale} = \rho_{vide} + \rho_{noire} + \rho_{ordinaire}$ حيث، بشكل تقريبى، ولإعطاء فكرة عن مدى الضخامة، ρ_{vide} = ٦٧ فى المائة من ρ_{totale}، و ρ_{noire} = ٣٠ فى المائة من ρ_{totale}، و $\rho_{ordinaire}$ = ٣ فى المائة من ρ_{totale} = ١٠ فى المائة من ρ_{noire}.

(٢٣) لاحظ أنه بعكس فكرة شائعة جدًا، ليس من الضرورة وصف الانفجار العظيم على أنه كان تمددًا لكرة من المادة فى مكان سابق الوجود. ويشغل الانفجار العظيم كل المكان، وهو الذى يُنشئ (تبعًا لمفهوم آينشتاين عن الزمكان الذى تم شرحه سابقًا) هو نفسه، وفى كل الأوقات، المزيد من المكان الذى ينتشر "فيه" (مثل مصدر ماء يتفجر ذاتيًا ويُنشئ كمية متزايدة من الماء).

تناول التفاصيل، لكننا نقول ببساطة إن التصنيف الكمى الجديد (الذى ظهر ما بين الثلاثينيات والخمسينيات) هو توحيد عميق بين التصنيفين القديمين المنفصلين للقوة والمادة، الذى يستخدم، تبعًا لتعريفه، مفهوم الزمكان لأينشتاين _ بوانكريه _ مينكوفسكى. وتوصف كل الجسيمات الأولية حاليًا (الكواركات واللبتونات leptons)، وتفاعلاتها (الكهرومغناطيسية، والضعيفة والشديدة) كأمثلة لهذا التصنيف الجديد للمجال الكمى Champ Quantique. والتفاعل الجاذبى هو الوحيد الذى يُظهر تعارضًا عميقًا مع النظرية الكمية وقد لا يمكن وصفه، حاليًا، على أنه "مجال زمكان كمى". ويبدو من المحتمل حاليًا أن التوحيد بين النسبية العامة والنظرية الكمية لن يكون تحققه ممكنًا إلا فى إطار نظرية كمية أكثر عمقًا من نظرية المجالات الكمية. وتلك النظرية الأكثر عمقًا فى طور الحمل حاليًا، وتحمل (حتى الآن) اسم نظرية الأوتار الكمية Cordes Quantiques. ويبدو التصنيف الجديد للوتر الكمى غنيا بما يكفى لتعريف إطار يتم من خلاله توحيد التصنيفات الأربعة القديمة للمكان، والزمن، والقوة، والمادة. وعلى مستوى من التقريب، تصف نظرية الأوتار الكمية كل عنصر من الواقع الفيزيائى على أنه نوع كمى من درجة اهتزاز "وتر" (أى اهتزاز شىء وحيد البعد مزود بشد مرن، مثل "خيط مطاط" صغير (من الكاوتشوك) يصبح طوله الثابت (فى غياب الشد) مهملاً). ونجد بشكل جدير بالملاحظة أننا إذا "كممنا quantifie" وترًا متحركًا فى الزمكان "المستوى" لبوانكريه _ مينكوفسكى، يمكن لإحدى درجات انتشار اهتزاز الوتر أن تتطابق مع (النوع الكمى ل) موجة أولية لتغير شكل الزمكان، أى لموجة جاذبية للنسبية العامة. ومن جوانب محددة، تبدو نظرية الأوتار الكمية كما لو كانت تعميمًا عميقًا للفكرة المركزية فى النسبية العامة: فكرة أنه لا يمكن أن نجد فيها بنية "جاسئة"، معطاة بشكل مسبق، ولكن أن كل بنية فيزيائية هى بنية "مرنة" و"قابلة لتغير شكلها"، أى هى مجال ديناميكى. وبشكل خاص، فإن كل ما كانت قد افترضته النسبية العامة أيضًا بأنه "جاسئ" (خصوصًا القيمة العددية لكل "ثوابت التفاعل" الفيزيائية)، يبدو، فى نظرية الأوتار، وقد أصبح مجالات ديناميكية، يمكن

لها أن تتأثر بالمادة المتصلة في الكون. وهذه الفكرة يمكن من جانب آخر اختبارها تجريبيًا إذا تحققت اختبارات عالية الدقة للخاصية الأساسية للجاذبية (تبعًا لجاليليو، ونيوتن، وآينشتاين معًا)، أى أنها تؤثر بشكل عام على الكتلة _ الطاقة، بطريقة تجعل كل الأجسام "تسقط"، بالتعجيل نفسه بالضبط، في حقل جاذبي. ويجري الاستعداد حاليًا لإرسال بعثات فضائية لاختبار "شمولية السقوط الحر universalite de la chute libre" بمستوى دقة أفضل ألف مرة، أو حتى مليون مرة، من مستوى التدقيق الراهن. ولو توصلت إحدى هذه البعثات إلى ما يتناقض، حتى ولو بدرجة ضئيلة جدًا، مع شمولية السقوط الحر (أى إذا توصلت إلى أن جسمين مختلفين يسقطان بعجلتين مختلفتين قليلاً) سوف يكون لدينا دليل دقيق لكى نتوجه إلى ما بعد النسبية العامة للحصول على وصف أكثر عمقًا[٢٤] أيضًا للبنية الديناميكية التى تضم الزمكان والكتلة – الطاقة – القوة – المادة.

وربما سيحمل لنا القرن الواحد والعشرين في هذه الحالة (ونتمنى أن يحدث ذلك) انقلابات جديدة في الأداة التصورية التى يستخدمها الإنسان لفهم الكون (والهيمنة عليه). ومع ذلك من المثير للكدر اكتشاف أنه رغم قدم الثورات التصورية العظيمة للقرن العشرين (النسبية الخاصة ١٩٠٥، والنسبية العامة ١٩١٥، والنظرية الكمية ١٩٢٥ – ١٩٣٠) يفكر غالبية معاصرينا ويعيشون الحياة تبعًا لأطر تفكير القرن التاسع عشر (الذى يعود هو نفسه فى أغلبه إلى القرن السابع عشر). مثال لذلك حقيقة أن مرور الزمن (الـ "الآن") لا يمثل شيئًا في الواقع الفيزيائى، وهو ما يجعلنا نستعيد جملة لآينشتاين إلى ابن وأخت بيسو Besso، التى تقول إن "الفصل بين الماضى والحاضر والمستقبل لا تتضمن سوى

---

(٢٤)من الواضح أنه إذا حدث ذلك، فلن يكون معناه بالضرورة أن نظرية النسبية العامة "خاطئة". ومن المعروف أن هذه النظرية سوف تظل "صحيحة" إلى الأبد في النطاق التجريبى بالغ الضخامة حيث تم "التحقق" منها، وحيث حلت محل نظرية نيوتن. لكن، كما هو الحال دائمًا فى الفيزياء، من الممكن أن ينتهى نطاق تحقق النسبية العامة، ويجب فى ما بعدها، تكملة أو تعديل النظرية واستخدام نظرية أكثر عمقًا، تتضمن نظرية آينشتاين كحالة محدودة.

قيمة وهمية، أيًا كانت صلابتها"، وهذه إحدى الرسائل المهمــة لنظريتــي النــسبية أهملها معاصرونا تمامًا (وكذلك القائمون بتبسيط العلم).

حالة البحث

ربما تكون أهم الأعمال الراهنة (فى الإنجليزية) فى النسبية العامة هى تلــك التى تدور حولها المشاورات (مجانًا) فى الإنترنت بالاتصال بالأرشيفات المتنوعــة فى /http://xxx.lanl.gov وخاصة أرشيف gr-qc (النسبية العامة وعلــم الكــون الكمــى). ومــن الــسهل الوصــول إلــى الموقــع الفرنــسى المماثــل: /http://xxx.lpthe.jussieu.fr

المراجع:

Historique

– BALIBAR (F.), *Einstein, la joie de la pensée*, Découvertes Gallimard, Science.

– EINSTEIN (A.), *La Relativité*, Payot, Paris, 1990.

Exposés élémentaires

– DAMOUR (T.) et DESER (S.), article « Relativité », Encyclopaedia Universalis, 1995.

– HAKIM (R.), *Gravitation relativiste*, InterÉditions/CNRS Éditions, Paris, 1994.

– SCHWINGER (J.), *L'Héritage d'Einstein*, Pour la Science, Berlin, Paris, 1988.

Exposés avancés

– LANDAU (L.) et LIFCHITZ (E.), *Théorie des Champs*, Mir, Moscou, 1989.

– MISNER (C. W.), THORNE (K.S.) et WHEELER (J. A.), *Gravitation*, Freeman, San Francisco, 1973.

– OHANIAN (H. C.) et RUFFINI (R.), *Gravitation and Spacetime*, Second Edition, Norton, New York, 1994.

– WEINBERG (S.), *Gravitation and Cosmology*, Wiley, New York, 1972.

علم الكون الحديث

الأدوات الجديدة لأرصاد الكون[٢٥]

بقلم: لورانت فيجرو

Laurent VIGROUX

ترجمة: عزت عامر

يبدو الليل مظلمًا، ليس فيه أى شيء. وبواسطة أجهزة الرصد الحديثة يكون الليل لامعًا. لكن التناقض هو أن الليل لا يكون مظلمًا ولا مضيئًا إلى درجة قصوى. بالتأكيد هو لامع، ولكن لماذا بهذه الدرجة الضئيلة؟ منذ القرن السابع عشر كان عالم الفيزياء الدانمركى أولبرج Olberg قد بيَّن كل الجزء الذى يمكن كشفه فى السماء اللامعة. فإذا كان الكون منتظمًا ولانهائيًا فإن لمعان السماء العائد إلى تراكب انبعاث كل المصادر التى يحتوى عليها الكون يجب أن يكون لانهائيًا. ولحسن الحظ فإنه من أجل الحياة على الأرض، لم يحدث أى شيء من ذلك. وكان لا بد من الانتظار حتى منتصف القرن العشرين لفهم التضمينات العميقة لهذا التناقض. وقد أنجز آينشتاين إطار هذا الفهم بواسطة نظريته حول الجاذبية. وأشارت أرصاد هابل Hubble فى السنوات ١٩٢٠ - ١٩٣٠ إلى أن الكون كان فى حالة تمدد. ونعرف الآن أن مكونات الكون كانت قابلة للتغير، وأنها تطورت مع الزمن. ونعرف أنها ليست موزعة بطريقة منتظمة فى المكان، وأن الكون القابل للرصد محدود. وهذا هو السبب وراء أن الليل ليس له لون سوى "الرمادى". وشهد فهمنا لعلم الكون تطورات مدهشة خلال السنوات العشرين الماضية. ويرتبط ذلك بتطورات الأرصاد، ويعود بشكل خاص إلى المراصد الفضائية، ولكنه يعود أيضًا إلى التطور المدهش للنظرية والمحاكاة الرقمية. وحول ماهية هذه التطورات، هذا ما سننتقل إليه باختصار فيما يلى من هذه المحاضرة.

---

(٢٥)نص المحاضرة رقم ١٨٤ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢ يوليو ٢٠٠٠.

الإشعاع

يعتبر المصدر الرئيسى للمعلومات فى الكون مكوناته الناشئة عن الـضوء. وبواسطة الضوء نعرف كل طيف الموجات الكهرومغناطيسية، التى تمتد من أشعة جاما والأشعة السينية، ذات الطاقة العالية، حتى موجات الميكـرو micro - ondes والموجات الراديوية radios ذات الطاقة المنخفضة، مرورًا بالضوء المرئى، وهو المألوف لدينا أكثر من غيره. وناقل المعلومات الذى يمثل الضوء، هو جسيم يطلق عليه اسم الفوتون photon، ومن خلال نظريات الفيزياء الحديثة، يمكـن وصـف انتشار الضوء أيضًا بمـصطلحات الموجـة ولـيس الفوتونـات (أى بمـصطلحات الجسيمات وبالأحرى الموجات). وبشكل عام، يكون عدد الفوتونات التـى يـستقبلها التلسكوب الحديث، فى حالة الطاقة المنخفضة، مرتفعًا جدًا، ويصل إلى عدة مئـات الآلاف فى الثانية، ويُفضل وصف الظواهر بمصطلحات الموجات. وبالنسبة للطاقـة المرتفعة، تكون الفوتونات أكثر ندرة، حيث تصل إلى بضعة فوتونات فـى الثانيـة بالنسبة للأشعة السينية، وبضعة فوتونات فى اليوم بالنسبة لأشعة جاما ذات الطاقـة بالغة الارتفاع، ويُفضل وصف الظواهر بمصطلح الفوتونات. لكن الفيزياء التحتيـة sous _ jacente تظل هى نفسها. والميزة الرئيسية للضوء أنه ينتشر فى خط مستقيم بدون أن يتم امتصاصه بإفراط. لذلك فإنه يتيح رصد مصادر بعيدة جدًا مـع تعيـين مواقعها. ومنذ الأزمنة العريقة فى القدم، كان الضوء هو الوسيلة الرئيـسية، إن لـم تكن الوحيدة، لمراقبة السماء. والمصدران الرئيسيان للضوء هما الإشعاع الأحفورى fossile المرتبط بالأطوار الأولى لتطور الكون، ومجموع الإشعاعات المنبعثة مـن مكونات الكون: النجوم، والمجرات، وركام المجرات amas de galaxies.

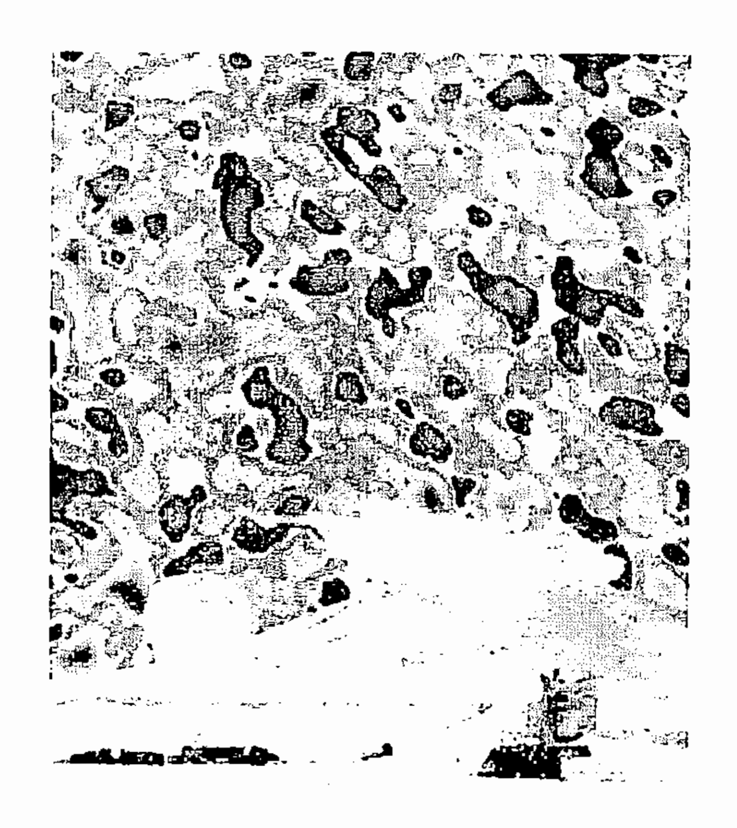
الإشعاع الأحفورى

فيما يتناقض مع أحلام التكنوقراطيين، تعتبر الاكتشافات الأكثر أهمية ثمـرة الأعمال غير المتعمدة. وهذا ما حدث أيضًا بالنسبة لاكتشاف الإشعاع الأحفـورى. وكان لحرب (٣٩ – ٤٥) عدد من الآثار السلبية، إلا أنها أحدثت تطورات مهمـة

فى التقنيات. وأظهرت هيروشيما أن ذلك لم يكن دائمًا من أجل الأفضل. لكن التطورات التقنية فى الرادارات كانت أصل التطورات المدهشة فى علم الفلك الراديوى radioastronomie بعد الحرب. ثم حدث الإحلال بعد ذلك بتطوير الاتصالات. كذلك حدث أن مهندسين من مختبرات بل Bell، هما بينزياس Penzias وولسون Wilson، خلال محاولتهما ضبط هوائى بالغ الحساسية، تعثرا فى شوشرة فى الأغوار موحدة الخواص ومتصلة. وأتاحت دراسة شوشرة الأغوار هذه التعرف على إشعاع سبق التنبؤ به فى إطار نظريات تمدد الكون. وبعكس ما يتم التأكيد عليه غالبًا، لا يرتبط هذا الإشعاع بالانفجار العظيم. وقد نتج تقريبًا بعد الانفجار الأولى. وهناك فى إحدى نظريات التمدد، أيًا كانت، تنبؤ بأن الكون مر بطورين ساخنين وكثيفين بما يكفى لأن تصبح الذرات متأينة بشكل كامل. وفى هذه الأحوال كان الكون ممتلئًا بالبروتونات، وبالنوى، وبالإلكترونات وبالفوتونات. وتفاعلت الفوتونات مع الإلكترونات. وكانت فى حالة توازن معها، ولم تستطع الانتشار إلى مسافات بعيدة. وبسبب تمدد الكون بردت المادة حتى اللحظة التى حدث فيها تكوُّن الذرات، واتحدت الإلكترونات مع النوى لتكوين الذرات. وأصبح الكون عندئذ شفافًا بالنسبة للفوتونات التى لم يعد لديها ما يجعلها تتفاعل. وعندئذ كان طيف طاقة الفوتونات هو طيف جسم أسود عند درجة حرارة الكون فى عصر إعادة التركيب recombinaisn. وبالتالى بردت حرارة هذا الجسم الأسود على أثر تمدد الكون. ويقترب فى الوقت الراهن من ٢,٧ كلفن، أى - ٢٧٠,٣ درجة مئوية. وهذا هو سبب عدم رصده إلا فى نطاق الموجات الميكرو وموجات الراديو. وتوجد قمة الانبعاث عند ١,٤ مم تقريبًا. ومنذ الاكتشاف الأولى احتاج الأمر إلى ثلاثين سنة حتى أصبح ممكنًا قياس طيف انبعاث هذا الجسم الأسود الكونى بدقة كبيرة. وأُنجز ذلك بواسطة القمر الصناعى الأمريكى كوب COBE الذى أُطلق فى ١٩٨٩. ويمكن التأكيد الآن بثقة أن هذا الانبعاث من أصل كونى بالفعل.

وهذا الإشعاع متساوى الخصائص فى جميع الاتجاهات ومنتظم بدقة بالغة الارتفاع. إلا أنه يمكن اكتشاف انحرافات صغيرة، إذا تُرجمت باصطلاحات درجة

الحرارة، فإنها تتفق مع تموجات بضعة مايكرو كلفن، أى تموجات بأجزاء من المليون. وتتطابق هذه التموجات فى طيف الفوتونات مع تموجات كثافة إلكترونات فى عصر إعادة التركيب. وكان الكون عندئذ متجانسًا تقريبًا، لكنه لم يكن متجانسًا تمامًا. وأدت تموجات الكثافة هذه بالتالى إلى نشوء المجرات وركام المجرات. وأدى قياس تموجات درجة حرارة الجسم الأسود الكونى إلى تعيين تموجات الكثافة بالفعل فى أصل الكون. ويعتبر كوب أول مرصد يتيح إثبات وجود هذه التموجات. ولسوء الحظ، تعتبر هذه النتيجة جبرية بعض الشيء بالنسبة للنماذج الكونية، لأن المقاييس الزاوية التى لدى كوب مدخل إليها ليست ذات مقاس عام بالنسبة لنوع المجرات والركام الذى نرصده حاليًا. ولقد أثبت كوب أن الكون لم يكن متجانسًا بشكل كامل، ولم يسمح بتحديد نوع الكون الذى نعيش فيه. ولكى نحرز تقدمًا، يجب أن يكون لدينا أجهزة يكون لها وضوح زاوى يقترب من بضعة دقائق قوسية minutes d`arc، أفضل بكثير من الدرجات السبع لكوب. ولقد نجح التلسكوب الأمريكى الإيطالى BOOMERANG، الذى أُطلق فى ١٩٩٩ بواسطة بالون فى رحلة طيران حول مناطق القطب الجنوبى لمدة خمسة عشر يومًا، للمرة الأولى فى إنجاز خريطة للتموجات على مقاييس زاوية بدرجة نحو عشرين دقيقة قوسية. وأوضح تحليل هذه التموجات أنها تتضمن كونًا مسطحًا. فلنتذكر أن هناك ثلاثة أنواع من الهندسة الممكنة فى نماذج الكون تتفق مع النسبية العامة لأينشتاين. ويتم تعريف هذه الأكوان بانحنائها الموجب، أو السلبى، أو المنعدم. ويبدو أن نتائج BOOMERANG (الشكل ١) تشير إلى أننا فى هذه الحالة الأخيرة، أى النموذج الأكثر بساطة، العادى أكثر من غيره. وأسفاه. وللتأكد التام من هذه النتائج، يجب انتظار القمر الصناعى الأوروبى PLANCK Surveyor المساح، الذى ستطلقه وكالة الفضاء الأوروبية فى ٢٠٠٧. وسيتمتع هذا القمر بوضوح زاوى أفضل من BOOMERANG وبأجهزة مماثلة يجرى إنجازها فى بلدان مختلفة، وفى فرنسا بشكل خاص، سوف يرسم خرائط كاملة للسماء، وهو ما لم تفعله المشروعات الأخرى. هل ترغب فى معرفة فى أى الأكوان تعيش؟ انتظر حتى ٢٠٠٧ وسوف تكون لديك الإجابة.



الشكل (١)

إذا كان لدى المرء عينان تريان فى نطاق الموجات الميكرو، وبـــالأحرى فى النطاق المرئى، سيكون للسماء مظهر هذه الصورة. سيكون لمعـــان السماء مهيمناً عليه بالشعاع الأحفورى الناتج عن تمدد الكون، ويمكن أن يميّز فيها التموجات الصغيرة الموجودة فى أصل المجرات. ويمثل هـــذا التشكيل المصور مشهداً من إطـــلاق البـــالون BOOMERANG فـــوق هضبة القطب الجنوبى، أمام البركان إيرباس Erbus. وتموجات العمـــق الكونى، هى تلك التى قاسها BOOMERANG.

تتيح دراسة الجسم الأسود الكونى رؤية ما كانت عليه بنيـــة الكـــون عنـــد بداياته. ولا يدل ذلك على شيء فيما يتعلق بكيفية تكوُّن الأجــرام أو المجــرات أو ركام المجرات، التى نلاحظها فى بيئتنا القريبة. ولحسن الحظ يمكننا استخدام قانون فيزيائى معروف تمامًا لكى نرجع إلى الوراء زمنيًا: السرعة المحــدودة للــضوء. ورصد مجرة تقع على بعد مليار سنة ضوئية، هو رصد لكونها كانت موجودة منذ مليار سنة. وصيد المجرات الشابة يرتكز على الانطلاق للبحث فى المناطق الأكثر بعدًا. ولسوء الحظ، هناك قانون آخر فيزيائى يجيء ضد هذه الخطة: تتضاءل قوة الإشعاع الظاهرية luminosite apparente لأى جرم سماوى مع مربع مسافة هذا الجرم، أى بسرعة كبيرة. ولو استعرضنا مجرة أبعد بمقدار عشر مرات، ســوف تظهر لنا أكثر خفوتًا بمائة مرة. ولمعرفة مدى الضخامة، فإن مجرة مثل مجرتنــا تقع على بعد ٥ مليارات سنة ضوئية، تكون فى منتصف عمرها الحالى، تظهر لنا أقل لمعانًا بمقدار مائة مرة مقارنة بسماء ليلة معتمة. والأحرى القول بأن البحــث عن المجرات الشابة يحتاج إلى تلسكوبات بالغة الضخامة، وهى الوحيدة التى لهــا قدرة التقاط كافية لرصد المجرات الأكثر بعدًا. ولهذا السبب لن تتحقق ثمــار هــذا البحث إلا بعد استخدام تلسكوبات ضخمة من النوع الذى يتراوح قطره بين ٨ و١٠ أمتار. وكانت أولى هذه التلسكوبات Keck على قمة مونا كى Mauna Kea فــى جزيرة هاواى Hawaii. ولن تكتفى أوروبا بالتلــسكوبات الأربعــة ذات الأمتــار الثمانية الموجودة فى صحراء أتاكاما Atacama، والتى تتضمن التــسلكوب بــالغ الضخامة Very Large Telescope. وبالفعل بدأ البحث بالتلسكوب الفضائى هابل، القمر الصناعى لناسا مع مشاركة قوية من وكالة الفضاء الأوروبية ESA. ويتــيح لك وجودك فى قمر صناعى، فوق الغلاف الجوى للأرض أن ترى صورًا تحتوى على بقع ضوئية أكثر بكثير مما تراه من الأرض. وهذا الاختيار الناجح ضرورى لرصد الأجرام الأكثر خفوتًا. واشتملت الاستراتيجية التى اُتبعت خــلال الــسنوات العشر الأخيرة على رصد المجرات البعيدة بواسطة التلسكوب الفضائى هابل، ثــم

على تمييزها بالتلسكوبات العملاقة على الأرض. وظهر أن هذا الأسلوب مفيد، حيث نجحت عدة مجموعات بين ١٩٩٦ و١٩٩٨ فى التوصل إلى أن المجرات البعيدة مختلفة عن المجرات المحلية. وإذا تعرفنا بشكل أفضل على نظير للمجرات القريبة، سنتعرف أيضًا على وفرة من المجرات الأصغر، والتى يكون لها لون أكثر زرقة من المجرات المحلية. ويعود هذا اللون إلى وجود نجوم حديثة. لذلك فإن هذه المجرات الصغيرة تكون فى أطوار كثيفة بالنسبة لتشكيل النجوم، أشد كثافة بنحو ثلاث مرات من القيمة المرصودة فى المجرات القريبة.

هل المدخل الصحيح هو البحث عن المجرات الحديثة واستخدام الضوء المرئى؟ للرد على هذا السؤال يجب أن نعرف طبيعة آليات بث الضوء بواسطة المجرات. من المعروف أن المصدر الرئيسى للطاقة هو الجاذبية، وهى التى تسمح للمجرة بأن توجد بصفتها جرمًا مميزًا. والجاذبية أيضًا هى التى تسمح للنجوم بأن تتشكل ويكون لها فى مركزها كثافات ودرجات حرارة كافية لحدوث التفاعلات النووية. والمصدر الرئيسى للإشعاع فى أى مجرة يعود إلى النجوم التى تتوطن فيها. وتحتوى المجرة العادية على بضعة مئات المليارات من النجوم. والطاقة النووية التى تنطلق فى قلبها تتحول إلى إشعاع. والشمس تضىء لنا بواسطة طاقتها النووية، وهو تناقض مسل عن الطاقات النظيفة. ولا تتكون المجرة من النجوم فقط، فهى ممتلئة أيضًا بالغاز والغبار. وهذا الغبار ما بين النجوم هو عبارة عن حبيبات تتراوح ما بين بضعة مئات من الذرات، وحبيبات ميكروسكوبية طولها بضعة ميكرونات. وتنحل إلى نوعين مهمين: حبيبات كربونية وحبيبات من السيليكات. وتمتص هذه الحبيبات جزءًا كبيرًا من إشعاع النجوم. ومن المثير أنها ساخنة وينبعث ضوء منها ذاتيًا. وبالتأكيد هذا سخان متواضع، حيث إن درجة الحرارة المتوسطة لحبيبات ما بين النجوم تقترب من ٢٠ كلفن، أى _ ٢٥٠ درجة مئوية. ومع ذلك فإن هذا يكفى لأن يصبح هذا الانبعاث قابلاً للقياس فى نطاق الأشعة تحت الحمراء. ويمكن لهذا السياق من تحويل الطاقة، وامتصاص إشعاع النجوم، وتسخين الغبار وإعادة الانبعاث فى نطاق الأشعة تحت الحمراء، أن يكون

مؤثرًا، حتى إن المجرات، فى الحالات المتطرفة، تشع نحو ١٠٠ فى المائة من طاقتها فى نطاق الأشعة تحت الحمراء. ويمثل ذلك أحد الاكتشافات المهمة للقمر الصناعى IRAS الذى أُطلق فى ١٩٨٣ ونُفِّذ من خلال تعاون أمريكى إنجليزى هولندى. وكان هذا القمر فى الأصل من سلالة الأقمار الصناعية المخصصة لدراسة السماء بالأشعة تحت الحمراء: ISO، القمر الصناعى الأوروبى الذى أُطلق فى ١٩٩٥، SIRTF[٢٦] القمر الأمريكى الذى يطلق فى ٢٠٠٢، و FIRST القمر الأوروبى وسوف يُطلق فى ٢٠٠٧. ويمثل كل منها نجاحًا بمصطلحات الحساسية وتغطية أطوال الموجات والوضوح الفضائى. وبتنسيق بيانات أرصاد ISO وCOBE استطعنا التوصل إلى أن المجرات تبث طاقة إجمالية فى نطاق الأشعة تحت الحمراء أكبر ثلاث مرات مقارنة بما ينبعث منها فى الضوء المرئى والأشعة فوق البنفسجية. وأوضح ISO أن المجرات، عندما كانت فى منتصف عمرها الحالى، كانت فى غالبيتها العظمى باعثًا قويا للأشعة تحت الحمراء. فإذا كان ٣ فى المائة فقط من المجرات الراهنة تبث طاقة أكثر فى نطاق الأشعة تحت الحمراء مقارنة بما تبثه فى الضوء المرئى، فإن ٣٠ فى المائة منها كانت على هذا المنوال منذ ٥ مليارات سنة. ما هو أصل هذه الظاهرة؟ وفقًا لكل الاحتمالات، يتعلق الأمر بوقائع تكوين النجوم الكثيفة التى كانت منتشرة فى الماضى. وبدراسة المجرات شديدة السطوع فى نطاق الأشعة تحت الحمراء، والتى تم اكتشافها بواسطة IRAS، نعرف أن هذه المجرات فى تفاعل مع المجرات الأخرى وتشهد لهيب تكوين النجوم شديدة الكثافة، بعد هذه التفاعلات. وتشير الأرصاد فى مجال الضوء المرئى إلى أنه كان يوجد، منذ نحو ٥ مليارات سنة، حشد من المجرات الصغيرة التى لا تناظرها مجرات فى وقتنا الراهن، وأشارت الأرصاد فى نطاق الأشعة تحت الحمراء إلى أن المجرات الضخمة لعصر حدوث لهيب تكوين النجوم ترتبط بالتفاعلات بين المجرات. والإغراء شديد فى التوفيق بين هذين النوعين من

---

(٢٦)تأخر إطلاق هذا القمر الصناعى، الذى أطلق عليه بعد ذلك سبيتزر Spitzer، على اسم عالم الفلك من أوهيو ليمون سبيتزر (١٩١٤ – ١٩٩٧)، حتى ٢٥ أغسطس ٢٠٠٣. (المترجم)

الأرصاد فى سيناريو مؤداه أن المجرات الكبيـرة ابتلعـت المجـرات الـصغيرة بالتدريج، مما دفع إلى هذه الأحداث المتمثلة فى البث الشديد للأشعة تحت الحمراء. ولم تعد حياة المجرات هادئة مثل حياة الكائنات الحية. الكبيرة تأكل الصغيرة.

ولقد تنبأت نماذج علم الكون بهذا المسار من الاندماج التسلسلى. أمـا عـن سرعة حدوث هذه الظاهرة فإنها تعتمد بقوة على بارامترات parametres النموذج. لذلك من الممكن بدراسة المجرات البعيدة إحكام النماذج وقيمة بارامتراتها. وسوف يتيح لنا SIRTF، وخاصة FIRST، تنقيح هذا التصور، والقدرة على إعادة رسـم التطور تبعًا لمرور الزمن. ولا يستطيع ISO سوى وصف ما حدث خلال الخمسة مليارات سنة الأخيرة، وسوف يتيح FIRST العودة إلـى أحـداث بدايـة تـاريخ المجرات تقريبًا.

وتتيح ISO، وSIRTF، وFIRST، اكتشاف هذه المجرات البعيـدة، وتتـيح قياس وفرتها تبعًا لتغيرات طول موجتها، ولا يسمح وضوحها الـزاوى الـضعيف بالحصول على صور صحيحة لهذه المجرات. فبالنـسبة لهـذه المراصـد تعتبـر المجرات مجرد نقاط. وللحصول على صور يجب استخدام قاعدة أخرى. وحتـى فى الفضاء يكون الوضوح الزاوى لأى تلسكوب محدودًا بظاهرة تـسمى الحيـود diffraction. ومن المستحيل تحليل مصدرين منفصلين بزوايا أصغر من زاويـة محددة تساوى قطر تلسكوب مقسومًا على طول موجة الرصد. وبالنسبة لتلـسكوب مترين على المدار، تكون قوة جهاز العزل(٢٧) محدودة فى نطاق الضوء المرئى ب ٠,١ ثانية/قوس second d`arc، أى ١/٣٦٠٠٠ درجة. وقد يبدو ذلك ضئيلاً، لكنه يظل كثيرًا للحصول على صور صحيحة للأجرام التى لا يكون قوس قطرها سوى بضعة ثوان، مثل المجرات التى تثير اهتمامنا. ويكون قطر التلسكوب على المـدار محدودًا بكفاءات الإطلاق. وحتى لو كانت الولايات المتحدة وأوروبا تـأملان فـى

---

(٢٧)جهاز العزل separateur: أو الفصل، أو الطاقة المميِّزة لأداة بصرية، هى قدرتها على التقاط الصور وفصلها عن الأشياء القريبة. (المترجم)

إطلاق تلسكوب ذى قطر ٨ أمتار على المدار فى نحو عام ٢٠١٠، وهو "الجيل الجديد من التلسكوب الفضائى"، فإن هذا سيظل بعيدًا جدًا أيضًا عن ما يجب، حتى يكون من الممكن الحصول على صور لهذه المجرات. وأما على الأرض، حيث يُضاف إلى ظاهرة الحيود هذه تشوه فى الصور يعود إلى اضطراب الغلاف الجوى، فيصل وضوح الصور إلى ثانية/قوس، فى الليالى الصحوة. والحل الوحيد للتخلص من الحيود، أو من اضطراب الغلاف الجوى، هو استخدام قاعدة أخرى للتصوير: التداخلات interferences. وكما تعلمنا من دروس الفيزياء، إذا رُكِّب الضوء الذى تم التقاطه بواسطة تلسكوبين، نحصل على نمط من الهوامش المظلمة والساطعة، يعتمد على الطور المناظر للموجات المضيئة التى تصل إلى التلسكوبين. وبتحليل نمط الهوامش يمكن حساب فرق الطور[٢٨] للموجتين، ومن ثم استنتاج اتجاههما الأصلى. وميزة هذه الطريقة أن التداخل بين الهوامش الساطعة والمعتمة يعتمد على النسبة بين المسافة الفاصلة بين التلسكوبين وطول موجة الرصد. بالجمع بين تلسكوبين متباعدين بمسافة ١٠٠ متر، يمكن الحصول على نفس قوة جهاز العزل المماثلة لتلسكوب أحادى monolithique ذى قطر ١٠٠ متر، وذلك أيًا كان قطر تلسكوبات مقياس التداخل. وتُستخدم هذه القاعدة منذ سنوات متعددة فى علم الفلك الراديوى. وبدأ استخدامها فى الضوء المرئى. وسوف يكون "التلسكوب بالغ الضخامة" الأوروبى من نوع مقياس التداخل الذى يجمع بين الضوء الذى تستقبله التلسكوبات الأربعة التى يتكون منها. لكن الجهاز الممتاز لدراسة المجرات البعيدة سيكون ALMA. وستكون مجموعة أتاكاما المليمترية الضخمة هذه عبارة عن شبكة من ٦٤ هوائيًا قطر كل منها ١٢ مترًا، سيتم تنظيمها على هيئة متصلة بواسطة الأمريكيين والأوروبيين فى صحراء أتاكاما على ارتفاع ٥٠٠٠ متر، فى شيلى. وسوف تعمل فى نطاق الأشعة تحت الحمراء البعيدة ما تحت المليمترية. ومن المتوقع وضعها فى الخدمة فى عام ٢٠١٠ تقريبًا. وستتيح

(٢٨)فرق الطور Dephasage: أو تفاضل الطور (بين ظاهرتين متناوبتين من توتر واحد). (المترجم)

الحصول على صور بوضوح زاوى أفضل من جزء من مائة من الثانية القوسية. وأخيرًا يمكننا أنرى بالفعل ما يشبه مجرة حديثة (الشكل ٢).



الشكل (٢)

صورة من قمة بارانال Paranal فى صحراء أتاكاما Atacama شمال شيلى. وتحمل هذه القمة التلسكوبات العملاقة الأربعة التى يتكون منها "التلسكوب بالغ الضخامة" الذى أنشأه مرصد أوروبا الجنوبية. وسوف يتيح وضع هذا المرصد في الخدمة وسيلة ممتازة لعلماء الفلك الأوروبيين لدراسة الكون البعيد.

المادة

لا يحتوى الكون إلا على إشعاع، وهو مادى أيضًا. وكان قد تم اكتشاف النجوم والمجرات منذ وقت بعيد، لكن ذلك لم يكن كل ما فى الأمر. ومنذ ١٩٣٥ كان عالم الفلك زويكى Zwicky، قد توصل، مستخدمًا تلسكوب جبل بالومار Palomar، إلى أنه لا بد من وجود كمية من المادة مهمة لم يتم اكتشافها بعد. وكان قد وصل إلى هذه النتيجة بقياس سرعات المجرات فى ركام المجرات. ومنذ نيوتن،

كان من المعروف وجود علاقة بين عجلة الأجسام والكتلة الجاذبة. فإذا زادت كتلة الشمس لكانت الأرض قد دارت بسرعة أكبر حول الشمس. وبالعكس، إذا عرفنا المسافة بين الأرض والشمس وسرعة دوران الأرض، يمكن استنتاج كتلة الشمس. وهى حالة المجرات نفسها فى الركام. فقياس سرعة المجرات فى الركام يسمح بحساب كتلة الركام. وحيث إننا نعرف كتلة المجرات، بواسطة قوة إشعاعها، من السهل المقارنة بين التقديرين. وهناك مشكلة: تكون الكتلة المقدرة بالديناميكا(٢٩) أكبر عشر مرات من تلك التى تم تحديدها فى المجرات. وتم التوصل بالتالى إلى أن المجرات تدور أيضًا بسرعة كبيرة بسبب كتلتها التى تم تحديدها فى النجوم. لذلك يوجد محتوى من المادة المختفية، تمثل نحو ٩٠ فى المائة من كتلة الكون. وكما تعتبر النجوم والمجرات أجرامًا لامعة ومتميزة، فإنها لا تمثل سوى جزء طفيف من الكون. ما هى هذه المادة المختفية؟

منذ زهاء خمسين عامًا، كان علماء الفيزياء الفلكية يبحثون عنها فى كل الأشكال المحتملة. فى البداية بحثوا عنها فى المادة بين النجوم، وتوصلوا إلى وسط ما بين النجوم يتكون من الغاز والغبار، لكنه لا يمثل سوى جزء من نحو عشرة من كتلة المجرات. وتم افتراض وجود وسط غازى فى ركام المجرات، بين المجرات. وتم العثور عليه. ويتعلق الأمر بغاز منخفض الكثافة جدًا، نواة لكل لتر، وساخن جدًا، عشرات الملايين من الدرجات. واكتشف هذا الوسط فى السبيعنيات بسبب ما ينبعث منه فى نطاق الأشعة السينية. لكن هنا أيضًا، لم يكن هذا كافيًا، حيث إن هذا الغاز يمثل كتلة أكبر من ضرب العامل ٢ فى الكتلة الموجودة فى المجرات. وتم البحث عن هذه المادة على هيئة نجوم منفصلة ذات كتلة طفيفة جدًا، فى حجم المريخ فى مجموعها. وهذه النجوم بالغة الصغر حتى إنها لم تبدأ فيها التفاعلات النووية. لذلك ظلت معتمة، من هنا أتى اسمها الأقزام السمراء naines brunes. لقد تم العثور عليها، لكنها غير كافية. وتلاحقت الأبحاث. وشارك علماء

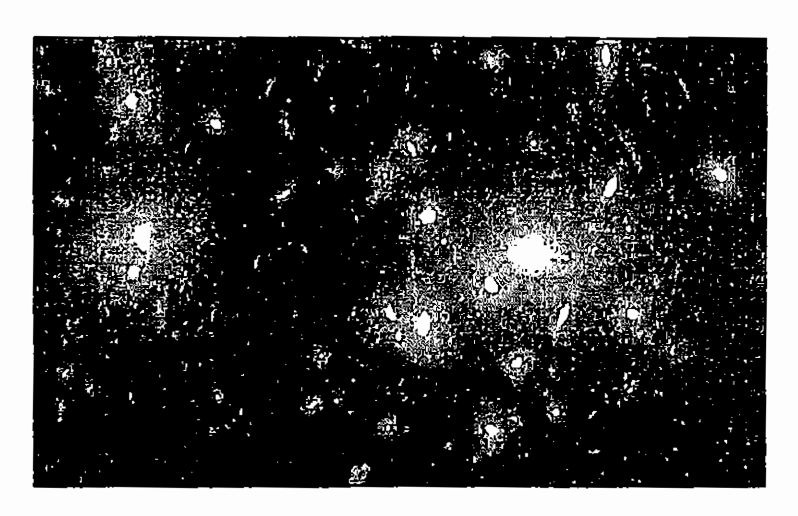
---

(٢٩) الديناميكا dynamique: قسم من المكيانيكا يتضمن العلاقات بين القوى والحركات. (المترجم)

فيزياء الجسيمات فى الأمر، ببحثهم عن جسيمات مجهولة. ومع أن النظريات المعروفة باسم التناظر الأعلى supersymetriques، التى تغرى بالتوفيق بين الجاذبية وميكانيكا الكم، تتنبأ بوجود جسيمات جديدة، فإنه ليس من البديهى البحث عن جسيمات مجهول كل شىء عنها. والأبحاث فى الوقت الحالى عديمة الجدوى. وتظل طبيعة هذه المادة السوداء matiere noire اللغز الأكبر فى علم الكون.

لكن المادة السوداء تصبح أقل فأقل سوادًا. ويتم التوصل بوسائل غير مباشرة إلى الحصول على صور لها. ويعتبر غاز الركام أداة ممتازة للتحليل. وهذا الغاز محفوظ فى الركام تحت تأثير شد الجاذبية الناجم عن المادة السوداء. فإذا عرفنا توزيع هذا الغاز يمكننا استنتاج توزيع المادة بحل المعادلات الديناميكية. وتم ضبط هذه الطريقة منذ عدة سنوات، لكن مازالت الحاجة قائمة لمعلومة أساسية: النمط الجانبى profil لدرجات حرارة الغاز بدلالة المسافة فى الركام. ويكون الغاز فى الواقع فى حالة اتزان بين ضغطه الداخلى، المرتبط بدرجة حرارته، والشد الجاذبى. وبدون النمط الجانبى لدرجات الحرارة هذا لا يمكن حل معادلات الاتزان. وقد تم إنجاز ذلك حاليًا بفضل مختبر الأشعة السينية الأوروبى XMM Newton. ويتيح هذا القمر الصناعى، الذى أُطلق فى نهاية ١٩٩٩، لأول مرة تحديد النمط الجانبى درجات حرارة الغاز فى الركام بشكل دقيق. ويسمح ذلك باستنتاج النمط الجانبى لكثافة المادة السوداء. ومن ذلك يمكن حساب بعض المقادير النموذجية لهذه المادة السوداء مثل درجة حرارتها، أو ضغطها الداخلى، أو قابليتها للانضغاط. ولحسن حظ علماء النظرية لا تتفق هذه النتائج مع أى من النظريات التى كان قد تم تطويرها حتى ذلك الحين. ومازال عليهم العمل لبضعة سنوات. وبشكل أكثر وضوحًا، فإن المادة السوداء تتيح بنفسها أدوات رصدها. وتبعًا لنظرية آينشتاين العامة لا ينتشر الضوء فى خط مستقيم حقيقى، بل ينتشر على طول خطوط تغير شكلها بمرورها على كتلة جاذبة. وتم التحقق من هذا التنبؤ بطريقة رائعة فى بداية القرن برصد ما يبدو على موقع النجم فى السماء من تغير، تدريجيًا كلما مرت الأشعة الضوئية بيننا وبينه بالقرب من الشمس. وبالطريقة نفسها، إذا

رصدنا مجرة تقع خلف ركام مجرات، فإن صورة هذه المجرة تبدو لنا وقد تغيـر شكلها بسبب مرورورها فى حقل جاذبى للركام. وتغير المادة السوداء شكل صـور الكون البعيد. وكان هذا التأثير العدسى الجاذبى lentille gravitationnelle معروفًا منذ زمن بعيد، لكن لم يتم استخدامه إلا منذ بضعة سنوات مع إنتاج جهاز تـصوير ذى قدرة تصويرية حساسة ويمكن التعويل عليها بما يكفى لكـى يـتم اسـتخدامها بطريقة منظمة لدراسة توزيع المادة السوداء فى الركام (الشكل ٣). وتظهر صورة المجرات التى تغير شكلها بسبب التأثير العدسى الجاذبى على هيئـة قـوس. وتـم اكتشاف أول قوس جاذبى بفضل الأرصاد التى توصل إليهـا التلـسكوب كنـدا ـ فرنسا – هاواى فى ١٩٨٥. ومنذ ذلك الحين، وبشكل خـاص بفـضل التلـسكوب الفضائى هابل، تم اكتشاف المادة السوداء تقريبًا فى كل الركام المرصـود. ومـن شكل القوس يمكن استنتاج اضطراب أشعة الضوء، ومن ثم توزيع المادة السوداء. والإشكالية فى حالة الرصد هذه معكوسة. ففى العادة يكون هناك مصدر وتلسكوب ثم ندرس الصورة، أما فى حالتنا هذه فلدينا مصدر وصورة ونحـسب التلـسكوب الذى أنتج هذه الصورة. وتلسكوب المادة السوداء هو الجهاز الأكثر ضخامة لـدينا، وكل ركام فى المجرة يمثل تلسكوبًا قطره عدة مئات من ملايين السنين الـضوئية وكتلته عشرات آلاف مليارات كتلة شمسية! ومن حسن الحظ أن الطبيعة هى التـى تتيحه لنا. ويسمح تلسكوب المادة السوداء من الآن بالحصول على خـرائط للمـادة السوداء فى الركام. وفى وقت حديث جدًا، أصبح من الممكن أيضًا، بفضل عمليات الرصد التى أنجزها تلسكوب كندا ـ فرنسا ـ هاواى، مـد هـذه الطريقـة إلـى مستويات تتجاوز قياس الركام التقليدى. وسوف يكون لهذا القياس الأولويـة لـدى الباحثين فى MEGACAM، كاميرا التصوير العملاقة القادمة قريبًا، والتى ستكون موجودة فى التلسكوب CFH فى نهاية ٢٠٠١.



الشكل (٣)

صورة لركام مجرات Abell 2218 التقطت بواسطة التلسكوب هابل. بالإضافة إلى مجرات الركام، التى لها مظهر الأجرام الإهليلجية أو الدائرية، نميز بوضوح شديد سلسلة أجرام على هيئة أقواس. إنها بالفعل مجرات تقع خلف الركام وقد تغيرت صورتها بواسطة التأثير العدسى الجانبى عند المرور فى الركام. وتتيح دراسة هذه الأقواس الرجوع إلى توزيع المادة السوداء الموجودة فى الركام.

لقد أحدث الكون المسطح، والمجرات التى تغير شكلها بسبب الاندماج التسلسلى fusion hierarchique، والمادة السوداء التى تقوم بدور تلسكوب، والتقدم الذى أنجز خلال السنوات الماضية، انقلابًا عميقًا فى معرفتنا بالكون ومكوناته. وعند جمع الأرصاد على كل أطوال الموجات، بفضل المراصد الفضائية، حددنا تقريبًا هوية كل المصادر التى يعود إليها سطوع السماء. وتم بالفعل إنجاز إحصاء الكون فى الوقت الراهن. وهذا فى حد ذاته محصول مدهش. إنها نتيجة للأبحاث التى بدأت منذ أكثر من ألفى عام. لكن المغامرة مستمرة. ويجب علينا فى الوقت

الراهن أن نفهم فيزياء هذه الأجرام، وتفاعلاتها وتطورها. ويجب أن نحـــدد نـــوع الكون الذى نعيش فيه. وسوف يتيح الجيل الحـــالى للتلـــسكوبات الـــضخمة علـــى الأرض، والجيل القادم للمراصد الفضائية الوصول إلى كل هذه الأهداف أو جـــزء منها. ويظل المجهول الكبير هو طبيعة المادة السوداء. لقد كانت كل الأبحاث فـــى هذا المجال دون جدوى. فى أى الاتجاهات نبحث الآن؟ عن دروب موجودة. فهـــل ستكون مثمرة؟ شديد الدهاء هو الذى يمكنه أن يتنبأ بذلك. وليس لـــدينا ســـوى أن نتمنى أننا سنجد الحل يوما ما. وربما يكون ذلك باكتشاف عرضى كما حدث فـــى اكتشاف الإشعاع الأحفورى.

الفيزياء الفلكية وفيزياء الجسيمات وفلك الجسيمات[٣٠]

بقلم: فرانسوا فانيتشى
Francois VANNUCCI

ترجمة: عزت عامر

مدخل

الفيزياء الفلكية هى العلم الذى يدرس الطبيعة على مستوى ما هو بالغ الضخامة، حتى أبعاد الكون كاملاً، أى نحو ١٠ ^٢٦ متر. وبالعكس فإن فيزياء الجسيمات تستكشف المادة على مستوى ما هو بالغ الصغر وتتيح حاليًا الغوص إلى مسافات تصل إلى ١٠ -^١٨ متر. ومن ثم فإن الفيزياء الفلكية وفيزياء الجسيمات تمثلان حدى المعرفة البشرية.

وتعتبر فيزياء فلك الجسيمات التقاء بين هذين الطرفين. وفى حين أن أهداف الفيزياء الفلكية من النوع الذى يُرى بالعين المجردة،[٣١] مثل الكواكب والنجوم والمجرات...، فإن فيزياء فلك الجسيمات تدرس أشياء مجهرية،[٣٢] الجسيمات الأولية نفسها، ولكن بدلاً من قصرها على ما تنتجه المعجلات، أصبحت مصادرها حاليًا فى الفيزياء الفلكية. وعمليًا تطور هذا النظام حديثًا بفضل علماء فيزياء الجسيمات الذين كانوا، بالنسبة للبعض، يشعرون بالضيق بالقرب من المعجلات، والذين بذلوا تقنيات الرصد لمراقبة الظواهر العنيفة التى تظهر فى السماء.

وتستخدم الفيزياء الفلكية الضوء كوسيط للمعلومات، أى الفوتونات التى تنتمى إلى المجموعة المرئية أو القريبة من المرئية، التى ترصدها أجهزة بصرية،

---

(٣٠)نص المحاضرة رقم ١٨٥ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٣ يوليو ٢٠٠٠.

(٣١)يُرى بالعين المجردة macroscopique: أو مرئى بالعين. (المترجم)

(٣٢)مجهرى microscopique: غير مرئى إلا بالمجهر. (المترجم)

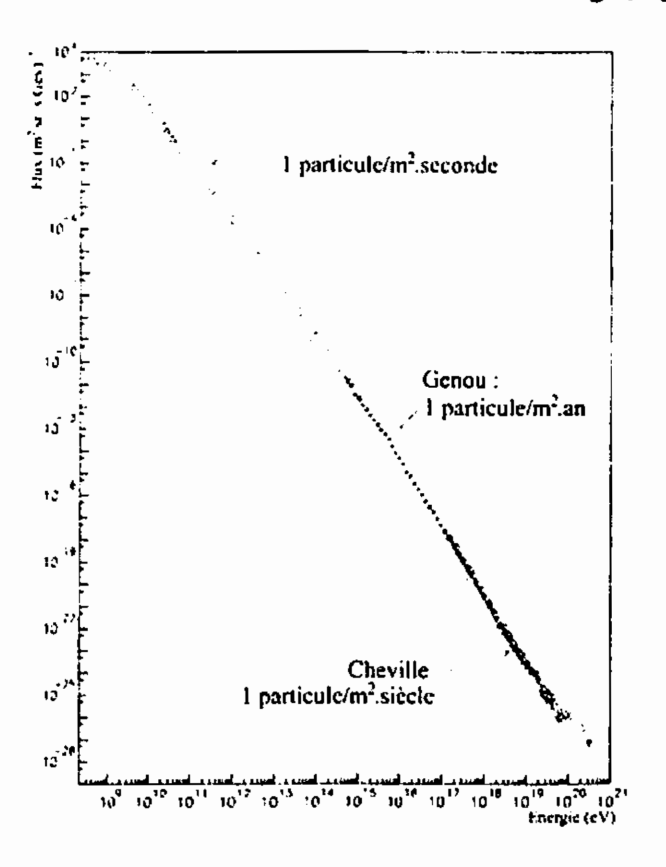
ألواح فوتوغرافية CCD. وتستعين فيزياء فلك الجسيمات بمجموعة أكبر من الوسائط: فوتونات ذات طاقات عالية، ولكن أيضًا ببروتونات أو نوى ذرية، وإلكترونات وجسيمات النيوترينو. وهدف هذه الفيزياء مزدوج، فهى تتيح فى الوقت نفسه فهمًا أفضل لمصادر هذه الإشعاعات، أى الظواهر فى بداية التسارعات الهائلة، ولكن أيضًا تتقيح المعرفة بخواص الجسيمات نفسها المنتجة فى شروط يستحيل الحصول عليها على الأرض.

مثالان

إشعاعات جاما ذات الطاقات العالية

الفوتونات المرئية هى الوحيدة التى يمكنها اختراق الغلاف الجوى دون أن يحدث لها امتصاص. وبالنسبة لأطوال الموجات الأخرى، فإن دراستها تتم فى قمر صناعى حيث شروط الرصد مثالية. لكن الأقمار الصناعية محدودة الأبعاد، ويكون تدفق الفوتونات ذات الطاقات العالية على درجة من الضآلة بحيث يكون من الضرورى إعداد أسطح اكتشاف كبيرة لإحصاء عدد كاف من الأحداث. وتتضاعف الفوتونات النشيطة فى الغلاف الجوى وينتج عن ذلك حزمة توصف بأنها كهرومغناطيسية يمكنها، فى حدودها القصوى، أن تصل إلى ملايين الجسيمات، وبشكل أساسى الإلكترونات والبوزترونات. ويكون لهذه الجسيمات أيضًا طاقة كافية لإعطاء طول لمسارها الضوئى الذى يمكن رصده بواسطة لواقط تغطى أسطحًا واسعة. ومن هذا النوع من الأجهزة، ما يطلق عليه Cat، وهو يعمل على سفوح جبال البيرنيه Pyrenees. فى حين أنه بالنسبة للضوء المرئى يمكن حصر مليارات المصادر، بالأشعة السينية، ويبقى هناك عدة آلاف، ولا يتم حاليًا سوى اكتشاف أربعة مصادر مؤكدة ذات طاقة تصل إلى ١٠^١٤ إلكترون فولت eV، وبشكل خاص بولسار pulsar، وكوكبة السرطان le Crabe ونواتين نشيطتين للمجرتين Mk 421 و501 اللتين تفاجآننا بالتنوع بالغ الاتساع فيما تبثانه. ومع

وصول طيف الفوتوات إلى الأرض فإنه يعطى من جانب آخر معلومـــات حـــول الوسط الذى اجتازه.



الشكل (١)

طيف أشعة كونية مُقاس حتى الطاقات القصوى.

الأشعة الكونية المشحونة

تمت دراسة الأشعة الكونية المشحونة منذ بداية القرن العشرين، وإن كـــان الكثير من علماء الفيزياء قد تحولوا إلى المعجلات فى منتصف القرن، فإن بعضهم كان يرصد من السماء من جديد، مما أتاح طاقات لا يمكن لأى معجـــل أن يـــصل إليها. ويمكن حاليًا كشف جسيمات، وربما فوتونات، تصل إلى طاقات ٥٠ جول،

وهى طاقة كرة تنس لم تعد صالحة! والشكل ١ يوضح طيف هذا الإشعاع مقاس حتى هذه الطاقات الملموسة.

ورُصدت بعض الأشعة الكونية تتخطى ١٠^٢٠ إلكترون فولت، وهى تمثل مشكلة، لأنه لا يمكنها أن تأتى من مصادر بعيدة جدًا بسبب الامتصاص الملازم للأعماق الكونية، ولكن من جانب آخر لا نعرف ظواهر تسارع ذات قوة كافية فى المناطق القريبة منا. وتفسرها بعض النظريات على أنها شواهد على ظواهر ترتبط بالانفجار العظيم.

وحتى نأمل فى حل اللغز الراهن يجب تجميع إحصاءات كافية. غير أن هذه الأشعة نادرة جدًا حيث إنها تقصف الأرض بواقع ١ لكل كيلومتر مربع وكل قرن. لذلك يجب تجهيز أسطح تجميع واسعة جدًا. وتم تكريس مرصد أوجير Auger لإعداد أجهزة على مساحة ٣٠٠٠ كم٢ على هضبة فى الأرجنتين. والشعاع الكونى ذو الطاقة المذكورة هنا يُنتج إجماليًا مليارات من الجسيمات الثانوية، ويرش الأرض على مساحة ١٠ كم٢ تقريبًا. ويتكون الكاشف detecteur من شبكة لاقطات capteurs يبعد كل منها عن الآخر بمسافة ١,٥ كم.

لغز النيوترينو

يمكن اعتبار جسيمات النيوترينو جسيمات فلكية "مثالية par excellence" لأنها توجد فى كل مستويات الكون، وهذا ما يجعل النيوترينو الجسيم، عدا الفوتون، الأكثر شيوعًا. وهناك مصدران شديدا القوة هما السبب وراء هذا الانتشار الذى لا حد له.

أولاً تأتى الشمس، فهى التى ترسل إلينا فى كل ثانية ٦٠ مليارًا من "جسيمات النيوترينو الشمسية"[٣٣] على كل سم٢ من أرضنا. وتنتج عن تفاعلات

(٣٣)جسيمات النيوترينو الشمسية helioneutrino. (المترجم)

الاندماج وهى أصل الطاقة التى تسبب لمعان نجمنا، وتقوم تنبؤات التدفق على حسابات معدة جيدًا حتى إن علماء النظرية يؤكدون أنه يمكن الاعتماد عليها إلى أجزاء من مائة تقريبًا. ويخترقنا هذا التدفق سواء فى النهار أو فى الليل لأن الأرض شفافة بالنسبة لجسيمات النيوترينو.

ويبث سوبرنوفا من النوع الثانى "٢أ" IIa كل طاقته تقريبًا بإطلاق ١٠^٥٨ "جسيمات نيوترينو مجرية"[٣٤] فى بضعة ثوان. وفى فبراير ١٩٨٧ وقع مثل هذا الانفجار على بعد ١٥٠٠٠٠ سنة ضوئية من أرضنا، فى سحابة مجلان العظمى grand nuage de Magellan، وهكذا نتج نحو عشرين من جسيمات النيوترينو تم اعتراضها فى أجهزة كشف ضخمة تحت الأرض.

وتنتج جسيمات نيوترونيو الغلاف الجوى "جسيمات النيوترينو الأرضية"[٣٥] من قصف الأشعة الكونية الأولية التى كانت موضوع كلامنا سابقًا، فى الطبقات الأكثر ارتفاعًا من الغلاف الجوى. وتتفاعل البروتونات لتعطى رخات تتفتت بسرعة، وينتج عن ذلك تدفق نحو ١ نيوترينو كل دقيقة لكل سنتيمتر مربع.

ويمكن أن تنشأ جسيمات نيوترينو أيضا من مصادر خارج المجرات وهى غامضة أيضًا، مثل نوى المجرة النشيطة والثقوب السوداء...، وبالنسبة لها أيضًا مازال التجريب يتعثر.

ويجب ألا ننسى الإنسان و"جسيمات النيوترينو البشرية".[٣٦] ويُنتج التفاعل النووى EdF ما يقرب من ١٠^٢٠ (مضاد) نيوترينو فى الثانية، بدون أى خطر على البيئة، وتسمح المعجلات بإنشاء حزم يمكن السيطرة عليها جيدًا والتى تبدو ملائمة أكثر للأبحاث الأكثر دقة المتعلقة بخواص هذه الجسيمات.

---

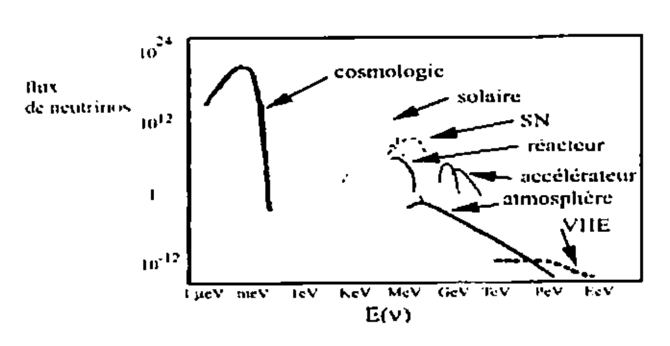
(٣٤) جسيمات النيوترينو المجرية galactoneurinos. (المترجم)

(٣٥) جسيمات النيوترينو الأرضية geoneutrinos. (المترجم)

(٣٦) جسيمات النيوترينو البشرية anthroponeutrinos. (المترجم)

وفيما وراء كل هذه المصادر المتنوعة، فإن المنتج الأكثر غزارة فى إنتاج هذه الجسيمات هو الانفجار العظيم، الذى وقع منذ نحو ١٤ مليار سنة. ونعرف عن طريق علماء الفيزياء الفلكية أن الانفجار الكبير الأصلى ترك ٣٠٠ من "جسيمات النيوترينو الكونية"[٣٧] فى كل سم٣ فى الكون. وقد تبدو هذه الكثافة ضئيلة، بالنسبة لكثافات الجسيمات فى المادة المألوفة، لكنها إذا أُدمجت فى كل حجم الكون، ينتج عن ذلك تعداد نيوترينو أكثر غزارة عدة مليارات من البروتونات، والنيوترونات والإلكترونات التى تكوّن الذرات.

كيف نهتدى إلى طريقنا وسط كل هذه الأنواع من جسيمات النوترينو؟ بالصدفة فإن هذه التعدادات المختلفة تتدرج فى مراتب من الطاقة يمكن تمييزها جيدًا. كذلك فإن جسيمات النيوترينو الكونية هى التى تتميز بالطاقة الأكثر ضعفًا، بالميللى إلكترون فولت، بينما علينا أن نتوقع أن تصل الطاقات إلى إكسا exa إلكترون فولت بالنسبة لجسيمات النيوترينو خارج المجرات. وبين هذين الطرفين، تتجمع جسيمات النيوترينو الشمسية حول ١ ميجا إلكترون فولت MeV وجسيمات نيوترينو الغلاف الجوى حول ١ جيجا إلكترون فولت GeV. والشكل ٢ يوضح مراتب الطاقات.



الشكل (٢)

توزيع على هيئة طاقات للمصادر المتنوعة لجسيمات النوترينو.

---

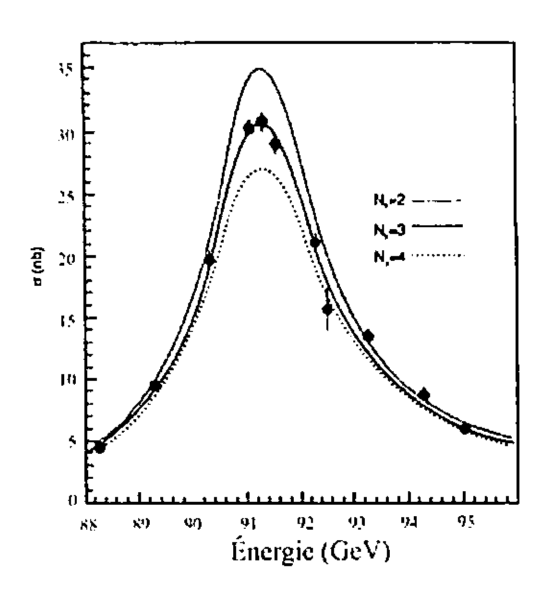
(٣٧) جسيمات النيوترينو الكونية cosmoneutrinos. (المترجم)

وهذه هى المفارقة المتعلقة بجسيمات النوترينو: فهى تحيط بنا بأفواج لا حصر لها، ومع ذلك فلا تأثير لها علينا البتة، لأنها لا تتحمل سوى التفاعل الموصوف بأنه ضعيف ويتوقف نيوترينو واحد ١ جيجا إلكترون فولت من بين ١٠٠٠٠٠٠ نيوترينو، خلال عبور الأرض، ومن هنا يأتى وصف الشبح الذى كثيرًا ما يُخصص لهذا الجسيم المتلاشى. واحتمال التفاعل ضعيف لكنه غير منعدم، وإلا ما كنا نعرف أى شىء عن هذه

الجسيمات. لذلك، وبفضل التدفقات بالغة الشدة الناتجة بالقرب من المعجلات القوية، وبفضل الكاشفات الضخمة، لدينا الآن ملايين التفاعلات المسجلة لجسيمات النيوترينو خلال عدة أجيال من التجارب التى تحلل بالتفصيل خواص قرانها بالمادة.

وقد يُنتج نيوترينو أحيانًا، خارج تفاعله، إلكترونًا محددًا: إنه نيوترينو إلكترونى ν_e. وتارة يعطى التفاعل ميونًا muon، وهو النيوترينو الميونى ν_μ، الذى يعتبر هنا تابعًا.

فهل تنتهى الحكاية عند ν_e و ν_μ ؟ لقد تم قياس عدد أنواع جسيمات النيوترينو الموجودة فى الطبيعة بدقة بفضل معجل المختبر الأوروبى لفيزياء الجسيمات CERN، والذى يطلق عليه LEP. والنتيجة النهائية: ٢,٩٩٠ ± ٠,٠١٧. ويأتى هذا القياس من دراسة Z^o، البوزون المتعادل، وسيط التفاعلات الضعيفة، الناتج خلال تصادمات e^+ و e^- والذى يتفتت فى شبه لحظة. ويوضح الشكل ٣ المنحنى الذى يطلق عليه إثارة بوزون Z^o. ويعتمد طول هذا المنحنى على هيئة الناقوس على عدد جسيمات النيوترينو. وكلما كانت هناك أنواع مختلفة، كلما أصبح المنحنى مستويًا، ويتيح تركيزه استخلاص العدد الكلى لجسيمات النيوترينو الذى يكون أكثر ارتفاعًا. كذلك تحتوى الطبيعة على ٣ من جسيمات النيوترينو المختلفة و٣ فقط من التى يُطلق عليها ν_e و ν_μ و ν_τ.



الشكل (٣)

منحنى "إثارة" رنين Zo الذى تم قياسه فى معجل LEP، وهو ما أثبت وجود ثلاثة جسيمات نيوترينو خفيفة مختلفة فقط.

تجربة كاميوكاند الفائقة والتذبذبات

لأن هناك ضرورة لإنشاء كاشفات ضخمة للحصول على عدد كاف من التفاعلات، فلنصف التجربة الطموحة التى أعطت النتائج الأكثر إقناعًا فى مجال جسيمات النيوترينو الشمسية وجسيمات نيوترينو الغلاف الجوى: تجربة كاميوكاند Kamiokand الفائقة التى أُنشئت فى منجم زنك تحت جبل يابانى بالقرب من قرية كاميوكا الصغيرة، وبدأ استخلاص معطيات التجربة فى أبريل ١٩٩٧. وتضمن هذا الجهاز كتلة عملاقة نحو ٣٥ مترًا فى ٣٥ مترًا فى ٤٠ مترًا مليئة بالماء النقى، يراقبها بشكل دائم أكثر من ١١٠٠٠ أنبوبة كهربائية ضوئية لمضاعفة الإلكترونات،[٣٨] وهى لواقط يمكنها كشف وجود بضعة فوتونات مرئية. إنها

(٣٨)جهاز كهربائى ضوئى photomultiplicateur لإمرار تيار كهربائى بواسطة سائل مضىء لمضاعفة الإلكترونات. (المترجم)

كاتدرائية واقعية تحت الأرض يوضحها الشكل ٤ (انظر ملحق للنص) خلال طور حشو الجدران بلبنات البناء. وفى الشكل نرى اختصاصيين فوق زورق خفيف يقومون بآخر عمليات الضبط للأجهزة الكهربائية الضوئية لمضاعفة الإلكترونات قبل أن يغطيها الماء.

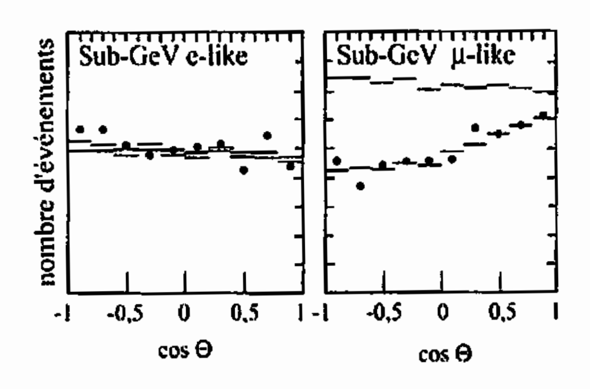
ويُنتج النيوترينو المتفاعل داخل الماء جسيمات مشحونة من أنواع مختلفة تعطى، إذا كان لها طاقة كافية، خلال اختراقها للماء فوتونات مرئية ناتجة عن ظاهرة يطلق عليها سيرينكوف Cerenkov. وتشبه هذه الظاهرة انبعاث موجة صدمة كهربائية، وتتولد فى كل مرة ينتشر فيها جزىء فى وسط بسرعة أعلى من سرعة الضوء فى هذا الوسط. وفى حالة الماء هذه، ينتشر الضوء بسرعة ٢٢٠٠٠٠ كم/ ثانية، ويتجاوز إلكترون شحنته ١ ميجا إلكترون فولت هذه السرعة. ويظهر مخروط ضوئى بطول المسار، تنتج عنه حلقة فوتونات على مستوى الأجهزة الكهربائية الضوئية لمضاعفة الإلكترونات.

وهكذا يُقاس تدفق جسيمات النيوترينو الشمسية أعلى من طاقة ٥ ميجا إلكترون فولت، غير أننا لا نحصر سوى متوسط التدفق الذى يتنبأ به علماء النظريات.

وفى تشكيلة الطاقة بين ١٠٠ ميجا إلكترون فولت وبضع جيجات إلكترون فولت، نكشف إشارة آتية من جسيمات نيوترينو غلاف جوى. وفى هذه الحالة الأخيرة تنتج تفاعلات جسيمات النيوترينو ν_μ ميونات، وتنتج تفاعلات جسيمات النيوترينو ν_e عن إلكترونات. من هنا فإن الميونات والإلكترونات تعطى حلقات مميزة بما يكفى لأن نتمكن من حصر حالات ظهور جسيمات النيوترينو ν_μ والنيوترينو ν_e مستقلة عن بعضها.

من جانب آخر ينبئ اتجاه الجسيم الذى يتم كشفه عن اتجاه النيوترينو الذى أفسح المجال للتفاعل، على الأقل فى الطاقات العالية الكافية. ومرة أخرى لا تكون النتائج متسقة مع التنبؤات. وتكشف تجربة كاميوكاند الفائقة جيدًا جسيمات

النيوترينو الإلكترونية على المستوى المتوقع، لكنها فيما يبدو تُظهر نقص جسيمات النيوترينو من النوع الميونى. وقدمت التجربة دليلاً إضافيًا قاطعًا. تنشأ جسيمات نيوترينو الغلاف الجوى من كل الاتجاهات، حيث إنها ناتجة عن كل محيط الأرض. وعمليات إعادة التجميع هذه التى تبدو قادمة "من فوق" تنشأ فى الجو الواقع مباشرة فوق موقع التجربة. وتكون قد اجتازت مسافة نحو ١٠ كيلومترات قبل كشفها. وتلك التى تنشأ "من أسفل" تنتج فى المتقابلان[٣٩] لذلك تجتاز ما يصل إلى ١٠٠٠٠ كم قبل وصولها إلى جهاز التجارب. غير أن النقص يظهر فى ν_μ "من أسفل" التى تكون قد اخترقت كل الأرض، أى جسيمات النيوترينو التى تجتاز مسافات شاسعة قبل كشفها. وقليلاً جدًا ما تتفاعل جسيمات النيوترينو مع المادة، ولم يكن من الواجب رصد نقص. ويوضح الشكل ٥ النتيجة بطريقة كمية ويقدم تغير التوزيع مع زاوية السمت zenithal. والنقص واضح عند جيب تمام الزاوية θ، ($\cos\theta = -1$).



الشكل (٥)

التوزيع وفى مقابله زاوية السمت لتفاعلات جسيمات نيوترينو الغلاف الجوى، وهو يشير إلى قيمة النقص ν_μ.

---

(٣٩) المتقابلان antipodes: مكانان على سطح الأرض يقعان على طرفى خط مستقيم وهمى يمر بمركز الأرض. (المترجم)

ومن ثم ظهرت جسيمات النيوترينو الشمسية والجوية جيدًا، لكن في الحالتين، يمثل التدفق الذي يتم قياسه شذوذًا بالنسبة إلى التدفق المتوقع. ويمثل الحصول على تطابق بعامل ٢ تقريبًا بين القياسات الدقيقة والتنبؤات المختلفة نجاحًا كبيرًا حتى الآن. ومع ذلك فإن علماء الفيزياء غير مسرورين بهذه النتيجة ويبحثون عن تفسير لعدم التوافق هذا.

ونجد جسيمات نيوترينو أقل مما نتوقع، ويبدو جزئيًا أنها اختفت بين مصدر إنتاجها ونقطة الكشف. إلا إذا كان بعضها، خلال رحلتها، قد تغير نوعه. والكاشفات الحالية لجسيمات النيوترينو الشمسية غير حساسة بالفعل إلا بالنسبة للنوع ν_e، ومن المحتمل أن ν_e الناتجة في داخل الشمس قد تحولت إلى ν_μ قبل وصولها إلى الأرض. وبالطريقة نفسها يمكن تفسير دلالات تجربة كاميوكاند الفائقة كما لو كانت تحول ν_μ إلى $\nu\tau$ التي تفلت عند الكشف، عبر مسافات تصل إلى قطر الأرض.

وظاهرة التغير التلقائي هذه لنوع من النيوترينو إلى نوع مختلف، يطلق عليها التذبذب oscillation. وهذه العملية مسموح بها في ميكانيكا الكم حيث إن لجسيمات النيوترينو كتلة. واحتمال حدوث هذه الظاهرة يعتمد على فرق مربعي الكتلتين بين نوعي النيوترينو المتذبذبين. وتتسم هذه الآلية بأهمية كبيرة، لأنها تتيح تقدير اختلافات كتل صغيرة جدًا، لا تتيحها كل الطرائق الأخرى. ومن هنا فإن السؤال الذي يُطرح في الوقت الراهن حول جسيمات النيوترينو يتعلق على وجه الدقة بكتلها، والمعروف فقط أنه إذا كانت هذه الكتلة موجودة، فلا بد أن تكون صغيرة جدًا.

والتفسير المقبول عادة لنقص جسيمات ν_e الشمسية بسبب ظاهرة التذبذبات يقود إلى علاقة بين الكتلتين m_1 وm_2، والحالتين المناظرتين ل ν_e وν_μ:

$m_2^2 - m_1^2 = 5.\ 10^{-5}\ eV^2$. وبالنسبة لجسيمات نيوترينو الغلاف الجوي فإن نقص ν_μ المرصود يشير إلى علاقة ثانية بين كتلتي جسيمي النيوترينو المتذبذبين:

$m`_2^2 - m`^2_1 = 3.10^{-3}\ eV^2$ وتنطبق بالأولى على الحالتين أنفسهما المناظرتين للزوج ν_μ و ν_e.

وتُجرى أبحاث التذبذبات فى مجال فعَّال جدًا، والكثير من أجيال التجارب بحثت عن تأثيراتها، سيان بالقرب من المفاعلات أو بالقرب من المعجلات، بدون إظهارها. والموقف الراهن ليس واضحًا بالكامل ومن المتوقع الحصول على إشارة إثبات مطلوبة من تجربة كاميوكاند الفائقة. ويجب أن تأتى من البرامج الجارى إنجازها فى اليابان أولاً ثم فى المختبر الأوروبى لفيزياء الجسيمات CERN والولايات المتحدة الأمريكية، والتى تحتاج إلى مسافات طيران شاسعة لكى تكون حساسية بالنسبة للكتل الصغيرة جدًا. وكذلك سوف تُطلق فى ٢٠٠٥ حزمة مُنتَجة فى جينيف، باتجاه نفق جران ساسو Gran Sasso بالقرب من روما، تتيح لجسيمات النيوترينو ٧٣٠ كم لتتذبذب. والكاشفات المبتكرة على مستوى المشكلة.

هل هى نهاية الفيزياء؟

خلال السنوات المائة الماضية، كانت التطورات فى المعارف العلمية مدهشة. وبالمقدار نفسه فيما يتعلق بتخوم متناهى الضخامة ومتناهى الصغر، تم إحراز ثمانى مراتب فى الضخامة. فنحن نميز الآن تفاصيل أكثر دقة مائة مليون مرة مما كان الأمر عليه منذ مائة

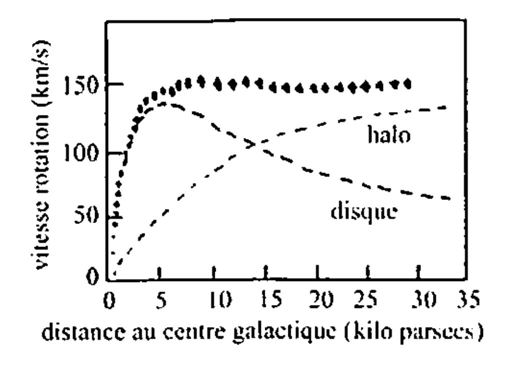
عام، ويمكننا الاقتراب من لحظة الانفجار العظيم نفسه. ويبدو أن تخوم المعلوم قد وصلت منذ الآن إلى حدودها. ولا يمكن التفكير، بالفعل، فى الذهاب إلى ما وراء الانفجار العظيم، ويتعثر أكثر فأكثر مبحث اللانهائى الصغر أمام حائط الضخامة.

ولا يمكن إنكار أن القرن العشرين سيعتبر قرن الفيزياء. وبدأ القرن الحادى والعشرون بكشف شفرة الجينوم البشرى، ويطلق عليه البعض قرن البيولوجيا. ونظرًا إلى أن البيولوجيا غنية بالوعود، تصل بعض العقول الجسورة إلى مواجهة

الخلود، فى حين أن إسقاطات فيزياء فلك الجسيمات تبدو خادعة، ويبدو المجال كما لو كان تسلية بالنسبة لعلماء الفيزياء.

ورغم أن الفيزياء لم تفش كل أسرارها، ربما نكون فى عشية ثورة كوبرنيكوسية جديدة. حقًا فإن الكون، كما يبدو، ملىء بنسبة ٩٥ فى المائة بمادة سوداء، تم كشفها عن طريق السرعات غير الطبيعية لدوران مجرات سماوية فى المجرات (الشكل ٦)، ومن طاقة سوداء ناتجة عن دراسات نجوم السوبرنوفا البعيدة مما يشير إلى أن تمدد الكون هو تسارع.

وفى هذه الحالة فإن المادة والطاقة الأسودين لا تمتان بصلة، على ما يبدو، بمادتنا العادية. والخلاصة أنه حتى عالمنا الذى تمت دراسته خلال القرون الماضية يبدو أنه لا يمثل سوى جزء بالغ الصغر من الكون.



الشكل (٦)

دليل على المادة السوداء تكشف عنه سرعات دوران أجرام سماوية تبعًا لبعدها عن مركز المجرة.

وفى غضون بعض الوقت نأمل أن تستطيع جسيمات النيوترينو تفسير المادة السوداء. وبالفعل فإن سيناريو الانفجار العظيم، بتنبؤه بتعداد لجسيمات النيوترينو أكثر انتشارًا بمليارات المرات من الجسيمات الأخرى، بكتلة تقترب من ١٠

إلكترونات فولت، كان كافيًا لأن تتجاوز الكتلة الكلية لجسيمات النيوترينو كتلة المادة المرئية وتؤثر من ثم على مصير الكون. وكان هذا السيناريو مفضلاً قبل نتيجة تجربة كاميوكاند الفائقة. ويبدو أن الخبرة اليابانية تشير حاليًا إلى مساهمة هامشية لجسيمات النيوترينو فى كتلة الكون، مع أنها تقترب من الكتلة المرئية، تلك التى تتكون من النجوم فى مجملها.

لذلك تم بحث المادة السوداء فى اتجاهات أخرى: الجسيمات الافتراضية مثل الأكسيونات[٤٠] أو الجسيمات فائقة التماثل supersymetriques. أما عن الطاقة السوداء فهى حاليًا لغز كامل.

ومن ثم مازال هناك ألغاز كبيرة تستطيع الفيزياء أن تحلها وعليها أن تفعل ذلك، لكن بالنسبة للبعض يبدو هذا البحث كأنه أمر خفى إلى درجة كبيرة ومقطوع عن المشاغل التى ثبتت أهميتها. ومع ذلك فإن كشف أسرار الكون يعتبر بالنسبة للإنسان أمرًا مثيرًا للحماس أيضًا مثله مثل نظم قصيدة أو تأليف سوناتة.[٤١] وتبرير مثل هذا البحث يقع فى مجال إثراء المغامرة الإنسانية. ولا يجب كبح الفضول العقلى. فالمعرفة ثمينة جدًا، ويمكن أن نأمل أنه فى يوم ما، عندما يكون العلم قد أجاب على كل أسئلة "كيف comment" عن الطبيعة، ويصبح السؤال "لماذا pourquoi" أكثر وضوحًا، وفى هذه الحالة يُطرح السؤال الأساسى عن الإنسان.

---

(٤٠)الأكسيون axion: جسيم أولى افتراضى ليس له شحنة ولا لف ويتفاعل مع المادية العادية (الإلكترونات، والفوتونات، والكواركات... إلخ)، لكن تفاعله ضعيف جدًا. ورغم أن الأكسيون، فى حالة وجوده، من المفترض أن تكون له كتلة بالغة الصغر فإنه لابد أن الأكسيونات كانت غزيرة فى الانفجار العظيم. وما تخلف منها ينافس عن جدارة المادة السوداء فى الكون. (المترجم)

(٤١)سوناتة sonate: لحن موسيقى لآلة أو آلتين كالكمان والبيانو. (المترجم)

المراجع:

– Winter (K.) éditeur, *Neutrino Physics*, Cambridge University Press, 1991.
– Crozon (M.) et Vannucci (F.), *Les Particules élémentaires*, « Que sais-je ? », PUF, 1994.
– Vannucci (F.), *Les Neutrinos sur la balance*, Images de la Physique/CNRS 1999.

الانفجار العظيم[٤٢]

بقلم: مارك لاشييز- رى

Marc LACHIEZE-REY

ترجمة: عزت عامر

لو كانت نماذج الانفجار العظيم هى التعبير عن علمنا المعاصر بالكون، فإن هذا الفرع من المعرفة بعيد عن أن يكون جديدًا، وهو بعيد أيضًا عن ما يُنسب للعصور القديمة، فالأنظار والأفكار سبق أن توجهت نحو السماء والعالم والكون.. وفيما يتعلق بالكون فى مجمله يوضح لنا علم الكون دون شك شيئًا ما عن المكان الذى نحتله. لقد أصبحت معرفة النواميس الكونية فى الوقت الراهن علمًا.

وفى أكثر الأحيان نُرجع أصل العلم الحديث إلى عصر جاليليو ونيوتن. ولقد وُلد علم الكون العلمى فى الفترة نفسها. وأحدث القرن العشرين انقلابًا فى علم الكون العلمى هذا بأن أضفى عليه خاصية النسبى، وبأن جسَّمه على هيئة نماذج، وخاصة مجموعة نماذج الانفجار العظيم. ولا يختص الأمر بنموذج فريد من نوعه، ورؤية متصلبة تمامًا عن الكون وتطوره، بل بالأحرى بمجموع التعريفات المحتملة، التى تشترك فى خواص عامة، بل أيضًا بالتباينات. وجزء كبيرة من العمل الراهن لعلماء الفيزياء الفلكية وعلم الكون يكمن، على وجه الدقة، فى البحث، فى قلب مجموعة نماذج الانفجار العظيم، عن أى منها يبدو أنه يصف كوننا بشكل أفضل. ويفحص هؤلاء العلماء أيضًا بلا توقف، عن طريق النجاحات التى أحرزت حتى وقتنا الحالى وتزداد بلا انقطاع، مصداقية هذا النوع من النماذج.

---

(٤٢)نص المحاضرة رقم ١٨٦ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٤ يوليو ٢٠٠٠.

ويقوم مفهوم الكون univers، مثل ذلك الذى نتصوره فى الوقت الراهن، على نفس موضوع علم الكون. لكنه لا يعود إلى أكثر من القرن السابع عشر، عندما تم إدراك وحدة "العالم Monde" وأصبحت مقبولة. وأقدم من ذلك بألفى عام كان أفلاطون Platon يصف "العالم" بأنه "الكون Cosmos"، مؤكدا بذلك على تآلف الكون (تبعًا للمصدر الاشتقاقى للتعبير اليونانى). وكانت العصور القديمة تصف عالمًا مختلفًا إلى حد بعيد عن عالمنا: فهو خاضع بالأحرى لشكل متسلسل أكثر من كونه موحدًا، ذى امتداد قليل جدًا وأقل أيضًا مما نعرفه فى وقتنا الحالى حيث إنه محدود بالمجموعة الشمسية. ويتشكل هذا العالم من كرات متداخلة بشكل متسلسل، تتمركز فى الأرض التى تقع فى مركز العالم: كرات القمر والشمس والكواكب حتى دائرة الثوابت،[٤٣] حاملة للنجوم "الثوابت". هذا ما كان يشكل تخوم العالم، المكتمل، المحدود.

وتم نشر تلك الأفكار من الناحية الأساسية بواسطة أفلاطون وأرسطو Aristote واستعملها العديد من علماء الرياضيات والهندسة والفلك، وسادت خلال ما يقرب من ألفى عام. وتعود إلى أصل فيثاغورثى pythagoricienne، الفكرة القائلة بسمو الدائرة والكرة، والتى استرجعها أفلاطون وبشر بها. ولقد لعبت هذه الأشكال واضحة التناظر دورًا حاسمًا، متناسبًا مع ضرورة وصف العالم المتآلف بطريقة متآلفة. وسيطرت هذه العقيدة ألفى عام، فكل الحركات السماوية يجب أن تتصف بتركيبات من الكرات والدوائر فى حالة دوران، واستمر ذلك حتى اكتشف جوهانس كبلر[٤٤] الطبيعة الإهليلجية للمدارات الكوكبية. ويمثل هذا الحدث التاريخى المهم، فى ملتقى القرنين السادس عشر والسابع عشر، أحد المقومات

---

(٤٣)دائرة أو كرة الثوابت Sphere des Fixes: دائرة سماوية تصورية تشترك فى الحركة اليومية للكواكب. (المترجم)

(٤٤)جوهانس كبلر Johannes Kepler (١٥٧١ - ١٦٣٠): عالم ألمانى يعتبر أحد مؤسسى علم الفلك الحديث. (المترجم)

الأساسية لأول انقلاب فى علم الكون. بدأت هذه النقلة الشاملة بعد عصر النهضة (مع العديد من الرواد مثل نيكول أوريسم Nicole Oresme ونيكولاس دو كيس Nicolas de Cuse..) ثم تواصلت حتى نهاية القرن السابع عشر. وفى هذا المجال وضع نيوتن اللمسة الأخيرة بـ "مبادئه Principia" التى ألفت بين أعمال العديد من الرواد (جيوردانو برونو Giordano Bruno، ونيكولاوس كوبرنيكوس Nicolas Copernic، وتيشو براه Tycho Brahe، وجوهانس كبلر، وجاليليو Galilee...). وهكذا وطد مبادئ الميكانيكا وعلم الفلك، وعلم الكون، وأسّس الفيزياء الحديثة.

وأصبح كون القرن السابع عشر أكثر ضخامة بكثير من كون العصور القديمة. لم يعد يقف عند دائرة الثوابت ولا ينحصر فى مجموعة شمسية: ليست النجوم جميعها على المسافة نفسها منا لكنها تتوزع فى كل الكون. ونقل كوبرنيكوس مركز العالم من الأرض إلى الشمس، ولكن نيوتن نفى بعد ذلك حتى فكرة وجود مركز للعالم نفسها. وهذا هو اعتقادنا الراهن: فى العالم المحروم من أى مركز، تعتبر كل الأماكن متكافئة، وليس لأى منها امتياز خاص. والعالم - الكون طالما ظل عالمًا موحدًا - متجانس. وهذا يعنى أن كل الأماكن متكافئة فى الكون، وأن قوانين الفيزياء تعتبر بالتالى متماثلة فى كل مكان وكل زمان. وهذه الفكرة عن شمولية (قوانين الفيزياء، والتحركات، وتركيب المادة) تجعل علم الفيزياء وعلم الفلك قابلين للوجود بكل بساطة. وتضمن الشمولية، مفهوم الكون، أن تكون نتيجة التجربة التى تُجرى هناك فى مكان ما متماثلة مع تلك التجربة التى تجرى هنا، وأن كل النتائج ستكون هى نفسها أيضًا إذا أجرينا التجربة غدًا. وتؤسس إمكانية إعادة الإنتاج هذه إمكانية إيجاد علم الفيزياء.

وأصبحت فكرة الكون، كما هو الحال مع عدد من الأفكار الأخرى الجديدة التى ظهرت فى هذا العصر، بعكس مفاهيم أرسطو: أكثر من مركز للعالم، أكثر من موقع متميز غير الأرض، وما هو أكثر من كون محدود مغلق ومن حركات دائرية. ولم يعد الكون مكونًا من عناصر أربعة (التراب والماء والهواء والنار)

ولكن من جسيمات صغيرة (العودة إلى الذرية).[٤٥] وتركيب الكون شمولى كما أثبت علماء الفلك فى القرن التاسع عشر: الكون هو بالفعل .. كون. فالمادة هى نفسها فى الأرض، وفى النجوم، وفى المجرات، وفى الفضاء ما بين النجوم وهكذا. وقوانين الجاذبية والكهرومغناطيسية والفيزياء الكمية والنسبية يتم تطبيقها فى كل هذه المجالات بالطريقة نفسها.

المكان والزمان والزمكان

صاغ نيوتن، وهذا أمر جوهرى، خواص المكان والزمان. وهذا الإطار الثابت للفيزياء يطابق الكون منظورًا إليه من وجهة نظر هندسية. وشهدت فيزياء نيوتن نجاحًا تلو نجاح خلال ثلاثة قرون، وتظل أيضًا فى الوقت الراهن فعالة جدًا بالنسبة لعدد كبير من المشاكل. وهى عقبات تتعلق فى جوهرها بالمفاهيم وليس بالأرصاد أو التجارب _ ولم يشكك أى شىء من جديد فى ملاءمة هذه النظرية للتنبؤ أو لتفسير كل النتائج التى يتم رصدها - التى أدت إلى وضعها موضع الشك فى بداية القرن العشرين، ومع تقديم نظريتي النسبية. وفى ١٩١٧ جددت النسبية العامة علم الكون بشكل جوهرى. وبعد عدة عقود بدأت فيزياء الكم تحتل مكانها كمُنظِّم مكمل لفيزياء القرن العشرين.

ومن ثم شهدت بداية القرن العشرين تجديدًا كاملاً للفيزياء، مما أحدث انقلابًا ثانيًا فى علم الكون قائمًا فى الوقت نفسه على نظرية النسبية العامة الجديدة وعلى نتائج الأرصاد جديدة. ولم يكن علم الكون الجديد، النسبى، وخاصة نماذج الانفجار العظيم، ليرى النور بدون هذا الاقتران المهم بين النظريات الجديدة (جاءت، وأنا أصر على ذلك، لأسباب تتعلق فى جوهرها بالمفاهيم) والنتائج الجديدة للأرصاد بفضل ظهور التلسكوبات الضخمة، واستعمال التصوير الفوتوغرافى وعلم الطيف spectroscopic (وهو الذى أتاح دراسة أجرام ذات

(٤٥) الذَرية atomisme: مذهب فلسفي قائم على أن الكون مؤلف من جواهر فردية متلاحمة ومتآلفة بصورة آلية. (المترجم)

لمعان شديد الخفوت، وبعيدة بالتالى مثل لمعان المجـــرات والكـــوازرات[٤٦]...).
وسمح هذا اللقاء بين النظرية وعمليات الرصد بتطوير علم كون جديد، أفضى إلى إعداد نماذج الانفجار العظيم.

الكون الكبير

منذ نهاية القرن التاسع عشر شغل جدل كبير مجتمع علماء الفيزياء الفلكية، بشأن تمدد كوننا. وكان فلاسفة الطبيعة، بعد عصر النهضة، قد أدركوا أنـــه يمتـــد أبعد بكثير من المجموعة الشمسية، وأن النجوم تتوزع على أبعـــاد مختلفـــة بالغـــة الضخامة. وأصبح من الممكن تأمل كون بالغ الضخامة، بل حتـــى لامتنـــاه كمـــا تصوره بعض الرواد من بينهم جيوردانو برونو. وفى نهاية القرن التاسع عشر لـــم يكن الكثير من إحصاءات النجوم التى أدرجها علماء الفلك على أنهـــا مجموعتنـــا الشمسية (نجم الشمس محاط بكواكبه)، سوى منطقة صغيرة جدًا فى وســـط حـــشد أكثر ضخامة بكثير يتكون من نجوم متشابهة: مجرتنا، مجرة درب اللبَّانـــة Voic Lactee، التى تشتمل على عشرات أو مئات المليارات من النجوم. وعندما رســـم علماء الفلك المدارات وضعوا فيها مجموعتنا الشمسية. وتظن الغالبية، فـــى هـــذا العصر، أن مجرتنا تمثل مجمل الكون. وفيما وراء مجرتنا لا يوجد شيء: فـــراغ وليس فيه مادة ولا نجوم. غير أن البعض كان يعتقد سابقًا أنه ربما يكـــون هنـــاك شيء آخر، فيما وراء ذلك بكثيـــر. ومـــن بيـــنهم الفيلـــسوف عمانويـــل كانـــت Emmanuel Kant الذى أومأ مثلاً، منذ نهاية القرن الثامن عشر، إلى وجود جزر كونية أخرى. وكصاحب رؤى، فإنه كان يسبق رؤيتنا لكون يتكون من حشد مـــن المجرات، تشبه فى الواقع جزر أرخبيل فى وسط المحيط.

وكان لا بد أن تثير هذه المسائل مجادلات أكثر فـــأكثر حـــدة عنـــد ملتقـــى القرنين.

---

(٤٦) الكوازار quasar: هو اختصار لكلمة إنجليزية لاسم المنابع الراديوية الشبيهة بالنجوم. (المترجم)

وكانت الأدلة التى يقدمها معارضو الجزر الكونية تبدو مقنعة جدًا، لكن اتضح فيما بعد أنها تعتمد على نتائج أرصاد خاطئة. وحُسم الجدل نهائيًا فى ١٩٢٤ بفضل الأرصاد التى أجراها عالم الفلك الأمريكى إدوين هابل Edwin Hubble. وباستعمال التلسكوبات الضخمة فى إجراءاته، نجح فى التوصل إلى أن أحد الأجرام السماوية، الذى كان يُطلق عليه فى ذلك الحين السديم العظيم للمرأة المسلسلة،[٤٧] يقع خارج مجرتنا نفسها، وحتى أكثر بعدًا عنها بكثير: أصبح واضحًا أن الكون يمتد كثيرًا فيما وراء مجرتنا، وأنه كان هائلاً، أكثر ضخامة من درب اللبَّانة. وظهر أنه مأهول بمجرات لا تُحصى: سديم المرأة المسلسلة (الذى يُطلق عليه فى وقتنا الراهن اسم مجرة المرأة المسلسلة) هو إحدى هذه المجرات، ويناظر مجرتنا تقريبًا لكنه يقع على بعد ملايين السنوات الضوئية. وفيما بعد اكتشف علماء الفلك من هذه المجرات الآلاف والملايين وربما ما يقترب من المليارات. وهكذا أصبح الكون فجأة، فى ١٩٢٤، بالغ الضخامة، ولا نعرف على أى حال فى الوقت الراهن إلى أى حد تصل هذه الضخامة. ولا نعرف حتى ما إذا كان المكان محدودًا أو لا متناهيًا. وتسمح النسبية العامة، القائمة على هندسة خاصة جديدة، توصف بأنها غير إقليدية، بوجود كون ذى حجم ومحيط محدودين، لكنه يفتقد لأية حدود.

التمدد النسبى

الكون إذن هائل، يتكون من مجرات لا حصر لها. لكن ذلك ليس سوى مظهر أولى لثورة علم الكون الجارية. وكانت كل سلسلة الأرصاد التى تعود إلى نهاية القرن التاسع عشر، والتى قد قام بها بشكل أساسى عالم الفلك الأمريكى فيستو سليفير Vesto Slipher، تشير إلى حركة واضحة وشاملة لكل المجرات. والأكثر من ذلك ظهور انتظامات مذهلة: كل الأجرام تتباعد، وليس هناك ما يتقارب (والاستثناءات النادرة جدًا ليس لها أهمية بالمرة فى هذا المخطط). وأخيرًا، كلما

---

(٤٧) المرأة المسلسلة Andromede: هى إحدى كوكبات نصف الكرة السماوية الشمالى، وتظهر فى ليالى الشتاء والخريف. (المترجم)

انخفض لمعان المجرات (وبالتالى كلما كانت أكثر بعـدًا)، كلمـا بـدت متباعـدة بسرعة. ويكشف ذلك عن نوع من حركة التمدد، حيث يتجاوز التمـدد والانتظـام والخواص ما هو أبعد من مستوى المجرات. وأدرك علماء الفلك بسرعة أن الأمر يتعلق بظاهرة ذات مستوى كونى (تتضمن الكون فى مجمله وليس هذا الجـزء أو ذاك منه) لكنهم لم يصلوا إلى تفسير لها. وهذا التمدد، الذى تم اكتـشافه بطريقـة تجريبية، ظل أيضًا فى ١٩٢٩ لغزًا كاملاً بالنسبة لعلماء الفلك، حتى صاغ هابـل قانونه الشهير الذى أوضح أن سرعة تمدد مجرة تتناسب مع بعدها. وكان الحل قد سبق الوصول إليه بالفعل فى ١٩٢٧ بواسطة عالم الفيزياء البلجيكى جورج لاميتر Georges Lemaitre (الذى كان قد صاغ قانون هابل) لكنه لـم يُعـرف لمجتمـع علماء الفلك إلا فى ١٩٣٠. ووجد لاميتر حلاً لهذه المشكلة فى علم الكون، عنـدما أشار إلى أن معادلات النسبية العامة تتضمن أن الكون يجب أن يكون فـى حالـة تمدد أو تقلص. وعند معرفته بأولى نتائج أرصاد سليفير فسرها على أنهـا كـشف عن هذا التمدد للكون مفهومًا فى إطار نسبى.

ولم تجد النتائج الأولية للاميتر، التى نُشرت فى ١٩٢٧ فى مجلة بلجيكيـة، أى صدى تقريبًا، وتساءل علماء الفلك أيضًا، فى ١٩٣٠، عن كيفية تفسير نتـائج سليفير وهابل. وفى ١٩٣١ أرسل لاميتر نسخة من مقالته لبروفيسوره السابق أرثر إدنجتون Arthur Eddington. وعندما نشرها إدنجتون مرة أخرى، أعطى لاميتر الشهرة التى يستحقها. وعندئذ تم فهم تمدد الكون وأصبح مقبولاً لدى غالبية مجتمع علماء الفلك (وتجدر الإشارة إلى أن عالم الفيزياء الـسوفياتى ألكـسندر فريـدمان Alexandre Friedman كان قد توصل منذ ١٩٢٢ إلى الحلـول نفـسها للنـسبية العامة، إلا أنه لم يربطها بنتائج الرصد): الحركة المرصـودة للمجـرات، بهـذه الدرجة من الانتظام، والتمدد بهذه الضخامة، والطبيعة الكونية أيضًا، والنسبية. كان من المستحيل أن يُنسب ذلك إلى سبب محلى: فلم تكن المجرات هى التى تتجـاذب أو تتدافع بتفاعلاته الخاصة. فالأمر يتعلق بخاصية للكون نفسه، مفهومـة وقابلـة للتفسير تمامًا فى إطار النسبية العامة.

وتبيِّن هذه النظرية بشكل أساسى أمرين جديدين تمامًا. الأول (سبق تقديمه فى النسبية الخاصة) ويتضمن دمج المكان والزمن فى ماهية أكثر شمولية يُطلق عليها الزمكان. والأمر الثانى أن هندسة هذا الزمكان يمكن أن يتغير شكلها، ولها انحناء، لها طوبولوجيا،[٤٨] ويمكن أن تتغير مع الزمن. وبالفعل فإن الهندسة الجديدة المكانية _ الزمانية يمكن أن يظهر عليها كل تغيرات خواص المكان فى الزمن كانحناء للزمكان. وهذه ميزة لذلك المدخل: يمكن اعتبارها تغيرًا فى الزمن، وتعتبر الآن كما لو كانت أثرًا هندسيًا خالصًا، فى الهندسة الممتدة لتتضمن البعد الزمنى. والحديث عن هندسة الزمكان هو إذا حديث فى الوقت نفسه عن هندسة المكان وتطورها فى الزمان. وفى هذا الإطار يظهر التمدد الكونى (للمكان) كما لو كان مظهرًا هندسيًا لهندسة الزمكان.

وليست المجرات فى حالة حركة فى المكان، لكن المكان نفسه فى حالة تمدد، وهو يجر المجرات كما يمكن لتيار فى نهر أن يجر مركبًا محركاتها فى حالة توقف. وهذه المراكب تكون غير متحركة بالنسبة للماء، أو بالأحرى، وبالمثل تكون المجرات ساكنة، أو بالأحرى غير متحركة بالنسبة للمكان الذى يجرها. فإذا لم يكن من المستطاع رؤية تيار المكان هذا بشكل مباشر، فإن النسبية تتنبأ بمثل هذه الظاهرة وتعطيها معنى: المكان فى حالة تمدد، ويتطابق الاكتشاف القائم على الرصد مع ابتكار النسبية التى تتيح إطارًا نظريًا لتفسيره.

وبمجرد الاعتراف بالتمدد، يبقى أن ينسحب على النتائج الفيزيائية. وهنا أيضًا نجد جورج لاميتر رائدًا بنموذجه عن الذرة الأولية (١٩٣١) الذى ينسحب على النتائج الفيزيائية فى تاريخ الكون. ولم تكن قد عُرفت بعد، فى ذلك العهد، لا الفيزياء النووية ولا فيزياء الجسيمات، وكانت الفيزياء الكمية تكاد تُعرف، وظلت هذه الأفكار مبهمة أيضًا. لكن تلك النماذج، التى أعدت من جديد وأعيد ضبطها،

---

(٤٨)طوبولوجيا topologie: هندسة لاكمية: دراسة الخصائص الهندسية التي لا تتأثر بتغيّر الحجم والشكل. (المترجم)

أصبحت فى النهاية نماذج الانفجار العظيم. ولم تُحدث أفكار لاميتر، فى ذلك العهد، والتى كان من المستحيل اختبارها، سوى القليل جدًا من الاهتمام، بل وأثارت منذ بدايتها عداء ما. وبالرجوع إلى الخلف تاريخيًا يتضح فى الوقت الراهن الوجه الدوجماتى (وهو ما يوجد أيضًا أحيانًا فى الوقت الحاضر) لجزء كبير من الانتقادات ضد الانفجار العظيم، نتيجة لصعوبة الشك فى فكرة تدعمت منذ عدة قرون، وهى شبه خرافية: فكرة عالم مطابق لنفسه إلى الأبد دون تطور. وحاول معارضون للانفجار العظيم أن يدعموا، دون أية معقولية دون شك، نموذجًا كونيًا يظل الكون تبعًا له مطابقًا لنفسه باستمرار (حالة ثبات)، فى حين أن الأرصاد تُظهر لنا بمزيد من الوضوح تمدد المجرات وتطورها. ولم تستطع تلك النماذج، التى كانت بشكل مبتكر مثيرة للاهتمام وبارعة، أن تصمد فى مواجهة الأرصاد. وأشارت ميول نقدية أخرى، وأحيانًا ما تكون هى نفسها السابقة، إلى التشابه بين أفكار لاميتر و"الواجب النورانى لأسفار الكتاب المقدس le Fait Lux des Ecritures". وبذلك اتهموا جورج لاميتر، الذى كان عالم فيزياء وقسيسًا كاثوليكيًّا فى الوقت نفسه، بالتوفيقية: ألم يدس معتقداته الدينية فى الفيزياء؟ ومع ذلك كان لا بد من تبرئة لاميتر الذى كان يدافع عن نفسه على الدوام ضد هذا الاتهام. وهكذا تعززت المبادئ العلمية لنماذج الانفجار العظيم بعناية أكثر مما واجهته من انتقادات شديدة.

وتجدد الاهتمام بالانفجار العظيم فى الأربعينيات، مع بداية تطور الفيزياء النووية. وأدرك علماء الفيزياء النووية أنه تبعًا لتلك النماذج، لا بد أن الكون قد مر بحالة كثيفة جدًا، بالغة الحرارة وشديدة التركيز، وهو كون مثالى لانتشار التفاعلات النووية. وبما أن هذه التفاعلات أنتجت عناصر كيميائية، أليس من المحتمل أن كل العناصر الكيميائية التى نلاحظها فى الكون - مثل الحديد، والنتروجين والأكسجين والكربون... إلخ - قد تم إنتاجها خلال اللحظات المبكرة جدًا للكون، تبعًا لنموذج الانفجار العظيم شديد الحرارة؟ الإجابة نعرفها فى الوقت الراهن، وهى فى الواقع بالسلب، لأن هذه العناصر لم يكن لديها الوقت لأن تتشكل.

ومع ذلك فإن العناصر الأكثر خفة من بينها (مثل الدتريوم، والهليوم، والليثيوم جزئيًا) قد تم إنتاجها بالطبع دون شك بهذه الطريقة، عند حدوث عملية التخليق النووى nucleosynthese الأولية التى تصفها نماذج الانفجار العظيم. ونحن نثق بذلك حاليًا لأن التوزيع الكلى لهذه العناصر فى الكون يتفق مع تنبؤات هذه النماذج.

وعاد من جديد الاهتمام بهذه النماذج خلال الستينيات. وبإنجاز حسابات جديدة للتفاعلات النووية استطاع بعض علماء الفيزياء فى برنستون Princton التنبؤ بأنه إذا كان تاريخ الكون قد جرى حقًا طبقًا لنماذج الانفجار العظيم، يجب أن تظل هناك حتى اليوم آثار للماضى المبكر جدًا – العصر الذى كان فيه الكون شديد الحرارة ومرتفع الكثافة – على هيئة إشعاع "أحفورى fossile" يمكن رصده. ولا بد أن هذا الإشعاع الكهرومغناطيسى كان ومازال يغمر كل الكون بموجات راديوية. وفى ١٩٦٤، عندما كان هؤلاء العلماء فى برنستون قد بدأوا فى إعداد جهاز فى محاولة لرصد هذا الإشعاع، اكتشفه لحسن الحظ زميلان من علماء الفلك الراديوى من شركة بل للهاتف Bell Telephone (بينزياس Penzias وويلسون Wilson اللذين حصلا بهذا الاكتشاف على جائزة نوبل) خلال اختبار هوائى استقبال مخصص للفلك الراديوى radioastronomie. وبتفسيرهم إياه فى البداية على أنه مجرد تشويش يجب التخلص منه، استنتجا فى النهاية وجود إشعاع منتشر فى كل مكان. وظهر أن خواصه، التى تم قياسها بسرعة، تتفق مع تنبؤات نماذج الانفجار العظيم. بذلك حازت هذه النماذج قبول جزء كبير من المجتمع العلمى (وليس كله).

أسس الانفجار العظيم

تُعتبر نماذج الانفجار العظيم حتمية تقريبًا. أوصلتنا إلى ذلك الأرصاد الفلكية وقوانين الفيزياء التى نعرفها بطريقة حتمية من الناحية العملية. ويتعلق الأمر بالدرجة الأولى بالتحقق من ضخامة الكون المتكون من مجرات، وهو ما تأكد منذ

١٩٢٤ بواسطة عدد لا يحصى من أرصاد المجرات البعيدة، بتلسكوبات تزداد قوة بلا انقطاع.

ويذكر علماء الكونيات قاعدة أساسية هى المبدأ الكونى. وحسب أسلوب التعبير المحدد عن مفاهيم ما قبل كوبرنيكوس، يوضح هذا المبدأ التكافؤ عند كل النقاط: ليس هناك مركز، وليس هناك حواف. والكون متجانس، تجانسًا يعبر عن نفسه على المستوى الكونى: يمكن أن تكون فيه مجرة هنا، وليس فيما يجاورها. ولكن على المستويات الكبيرة جدًا، فيما يتجاوز مستويات ركام المجرات أو الركام الفائق super _ amas للمجرات (ما يصل إلى عدة عشرات الملايين من السنوات الضوئية، لكن ذلك أقل بكثير من المستويات الكونية) ليس هناك منطقة ما حيث تكون المجرات أكثر أو أقل كثرة أو اختلافًا. ويتعارض هذا المبدأ مع كل مفاهيم "الكون مخلوق ليرصده البشر anthropique" أو الكون الذى تحتل الأرض مركزه geocentrique. ويوضح هذا المبدأ أيضًا أن الكون متساوى الخصائص فى جميع الاتجاهات isotrope: ليس فقط أنه لا توجد فيه أية نقطة ذات صفات خاصة، ولكن أيضًا لا يوجد أى اتجاه ذى صفات خاصة، وليس هناك ما هو أعلى أو ما هو أسفل أو مركز بالنسبة للكون، لذلك ليس هناك اتجاه نحو مركز ما، أو محور دوران. وفى غياب ما يدل على عكس هذا الذى ذكرناه، تم تبنى هذا المبدأ لإنشاء النماذج الكونية.

ومع ذلك، يظل المبدأ الأساسى لنماذج الانفجار العظيم تمدد الكون. ويعتمد هذا المبدأ على ما يطلق عليه ظاهرة دوبلر effet Doppler: حينما يبث جسمًا (مصدرًا) إشعاعًا، فإننا نرى هذ الإشعاع "مضغوطًا resserre" (أى يكون له تردد أعلى) إذا كان يقترب منا، أو "مرتخيًا desserre" (بتردد أقل) إذا كان المصدر يبتعد. وعندما يبث نجم أو مجرة ضوء (نوع خاص من الإشعاع فى النطاق الكهرومغناطيسى) الذى يتمكن من الوصول إلينا، فإن هذا الضوء يكون مزاحًا بطول موجة أقل أو أكثر (نحو الأزرق أو نحو الأحمر) إذا كان المصدر يقترب

منا أو يبتعد عنا. وهذا هو ما يتم رصده بالضبط: وبشكل خاص فإن الإزاحة نحو الأحمر توضح بالأحرى أن المجرة تبتعد. وفى طيف أى مجرة، أى فى مكونـــات الضوء الذى تبثه، يمكن لعلماء الفلك أن يعرفوا على وجه الدقة الإزاحة المتوقعـــة، نحو الأحمر أو نحو الأزرق (التى يتم قياسها تبعًا "لخطوط raies" معينة موجـــودة على أطوال موجات محددة تمامًا). لذلك فإنه منذ فيستو سليفير يقيس علماء الفلـــك سرعات المجرات ويقيمون الدليل على تمدد الكون؟ وهناك بعض علماء الفيزيـــاء وعلماء الفيزياء الفلكية الذين يعترضون على هذا التفسير، لكنهم لم ينجحـــوا فـــى تقديم تفسير مُرْض آخر. ومن ثم فإن تمدد الكون يقوم على أساس راسخ.

ويرى آخرون أن تطور الكون قد يكون محكومًا بشىء آخر غير الجاذبيـــة. إلا أن كل التفاعلات الأخرى المعروفة، مثل التفـــاعلات الكيرومغناطيـــسية، ذات قدرة محدودة جدًا. لذلك يبدو أن الكون محكوم تماما بالجاذبية التى تـــصفها هـــى نفسها نظرية النسبية العامة (وهذا الافتراض الأخير يدور جدال حوله حاليًا: حتـــى لو أن تحليلات المجموعة الشمسية

بعض المنظومات الفيزيائية الفلكية تدعم هذا الافتراض،[٤٩] فإنـــه لـــم تـــتم البرهنة بشكل نهائى بأنه ينطبق على مستوى الكون فى مجمله. لكن لا توجد أيـــة نظرية أخرى حاليًا ويظل من المنطقى القبول بصحته. ومع ذلك فإن تبنى نظريـــة منافسة لن يغيِّر دون شك الخواص الأساسية لنماذج الانفجار العظيم).

وتصف النسبية العامة الكون بأنه زمكان ذو صفات هندسية (منحن خاصة) تتضمن التطور الزمنى. وتبعًا للنسبية العامة تعتمد هذه الصفات الهندسية، بواسطة معادلات آينشتاين، على محتوى طاقة الكون. وتسهم المادة الكثيفة مثلاً فى إبطـــاء التمدد. وتبعًا لاحتواء الكون على الكثير أو القليل من هذه المادة (فى المتوسط)، أى أن يكون أكثر أو أقل كثافة، سيتباطأ التمدد أكثر أو أقل (حتى إنه مـــن المحتمـــل تصور أنه يتسارع).

---

(٤٩) انظر مادة المؤتمر ١٨٣ لجامعة كل المعارف التى قدمها ت. دامور.

وبقبول أن النسبية العامة والفيزياء راسختان جيدًا (الكهرومغناطيسية، والفيزياء الذرية، والديناميكا الحرارية، والفيزياء النووية، وعلم الفلك... إلخ) لا مفر من أن يفضى بنا الأمر إلى نماذج الانفجار العظيم. ولكى ننازعهما ونصف الكون بنموذج آخر (ويبقى أن نعثر عليه)، يجب أن نعيد النظر فى كل جوانب الفيزياء التى نعرفها حاليًا. ومثال لذلك أن مؤيدى "النماذج الساكنة" يجب عليهم افتراض ظواهر فيزيائية جديدة: وجود جسيمات مادة سالبة، والنشوء التلقائى للمادة (انطلاقًا من لا شيء). وفى الوقت الحالى فإن نماذج الانفجار العظيم هى الوحيدة التى تنجح فى وصف ما نرصده، وكل المقترحات بنماذج منافسة دحضتها التجربة. ولكن ربما فى يوم ما...

نماذج الانفجار العظيم

تشير هذه النماذج فى المقام الأول إلى أن الكون موحد التركيب homogene وموحد الخواص isotrope، وفى حالة تمدد. وتتطابق الحسابات والأرصاد لكى تثبت أن هذا التمدد يحدث بلا أى تغير ملحوظ بدءًا من فترة زمنية محددة t_u، يُطلق عليها عمر الكون، والذى يُقدر حاليًا بنحو ١٥ مليار سنة (ومع وضع عناصر عدم اليقين فى الاعتبار يجب أن نقول إنه بين ١٠ و٢٥ مليار سنة). وهذا يتضمن، بالتالى مباشرة، أنه لا يوجد فى الكون ما يمكن أن يتخطى عمره t_u . غير أن تقديرات أعمار الكواكب، والنجوم، والمجرات، تصل تقريبًا إلى كل القيم الممكنة بين صفر و١٥ مليار سنة. وهذا نجاح بالنسبة للانفجار العظيم! وحقًا لو لم يكن عمر الكون خمسة عشر مليار سنة، فكيف نفسر أننا لا نرصد أى نجم أو مجرة فى عمر يتجاوز ذلك؟

وبسبب التمدد توجد المادة الكونية بأحجام أكثر فأكثر ضخامة. وبقول آخر، فإن كثافتها تخف ومن ثم فإنها تبرد، بما يتطابق مع قوانين الفيزياء. وفى الوقت نفسه فإن التخفيف والتبرد يصاحبهما تشكل بطيء. كذلك فإن نماذج الانفجار

العظيم تحدد تاريخًا للكون المتمدد منذ خمس عشرة سنة، وهو فى حالــة تخفيــف وتبرد وتشكل.

وكلما عدنا أكثر فى الماضى كلما كان الكون أكثر تركيزًا وحرارة، وكلمــا كان أقل تشكلاً. وهو مأهول فى الوقت الراهن بأجرام متشكلة، سيان على المستوى المجهرى _ الذرات، والجزيئات، والبللورات _ أو على المستوى الفلكى: نجــوم، ومجرات، وكواكب. ولم يكن هناك شىء على الإطلاق فى الكون الأولى. وتتــيح نماذج الانفجار العظيم إعادة صياغة التطور الماضـــى للكــون بتطبيــق قــوانين الفيزياء. ويؤدى ذلك إلى التمييز بين عصرين: الكون الأولى primordial المناظر لأول مليون سنة، وعهد المادة الذى تلاه أكثر طولاً بكثير واستمر إلى ما يقرب من خمسة عشر مليار سنة. ومع أن الكون الأولى كان أكثر قصرًا بكثير فإنــه كــان موطنًا للعديد من ظواهر ذات أهمية كونية.

وشهد الحد الفاصل بين هاتين الفترتين الزمنيتين حالة انتقالية، حــدثًا بــالغ الأهمية يطلق عليه استئناف الاتحاد.[٥٠] كان الكون الأولى (أول مليون سنة) غيــر مُنفذ للإشعاع الكهرومغناطيسى لا يخترقه: ولن نتمكن أبدًا من رصــد أى شــىء مباشرة عن تلك الفترة. ولا يمكن إلا استرجاعها بتطبيق قوانين الفيزياء، وهذا مــا تقوم به نماذج الانفجار العظيم. وحدث خلال هذه الفترة أن أنــتج الكــون الأولــى الجسيمات الأولية فى البداية ثم النوى الذرية الأكثر خفــة. وفــى آخــر الأمــر، وبالضبط فى لحظة استئناف الاتحاد، تم إنتاج الذرات الأولى بالمعنى الدقيق. وكان الكون الأولى مغمورًا فى إشعاع كهرومغناطيسى، حيث كانت الطاقة حينئذ تفــوق طاقة المادة بكثير (فى حين أن طاقة الإشعاع حاليًا أقل ألف مرة من طاقة المادة). ولم تكن الذرات قد تكونت بعد، ولم يكن يوجد فى الكون الأولى أى بنيــة، ســوى بضعة نوى ذرات.

---

(٥٠) استئناف الاتحاد أو إعادة الاتحاد recombinaison: اقتناص إلكترون بواسطة أيون مع إشــعاع طاقــة التأين وطاقة حركة الإلكترون. (المترجم)

ويسجل استئناف الاتحاد اللحظة التى أصبح عندها الكون شفافا. وبالتالى فإن كل ما يستطيع علماء الفلك رصده وقع فى زمن أكثر تـأخرًا. ويعتبـر اسـتئناف الاتحاد فى حد ذاته حدثا مثيرا للاهتمام جدًا، لأنه عند تلك اللحظـة حـدث بـث للإشعاع الشهير المنتشر فى غور الكون، والذى نرصده محيطـا بنـا، فـى كـل الاتجاهات: ولدينا الانطباع بأننا فى مركز كرة هائلة تتألق بقوة إشعاع[٥١] (علـى هيئة موجات راديو) منتظم. وفيما وراء هذا السطح يوجد الكون غير الشفاف الذى لا يمكن رصده (وبسبب السرعة المحدودة للضوء، فإن ذلك التعبير "الماوراء _ au dela " له مدلول مكانى وزمانى فى الوقت نفسه). ولقد أشارت الأرصـاد الأكثـر حداثة إلى أن كثافة هذا الإشعاع متماثلة تمامًا فى كل اتجاهات السماء، إلى تقريب بضعة أجزاء من المليون. وهذا أحد الأدلة القوية التى تدل على أنه لم يكن ليحدث إلا فى إطار نماذج الانفجار العظيم. وبالإضافة إلى هذا التجانس الملفـت للنظـر، يتصف ذلك الإشعاع بتوزيع طاقة بالغ الخصوصية: طيف جسم أسـود، معـروف جيدًا لدى علماء الفيزياء، يكشف عن حالة توازن حرارى. لذلك فإن رصد غـور الانتشار الكونى يدل على أن الكون فى مجمله لا بد أنه كان متوازنا حراريًا فـى ماضيه بالغ البعد، وهو ما تتنبأت به بالضبط نماذج الانفجار العظيم. وتؤكد نتـائج الأرصاد بالغة الكثرة لغور الانتشار الكونى (والأكثر شهرة من بينها تلـك التـى جرت بالقمر الصناعى COBE) أفضل فأفضل التطابق الاسـتثنائى بـين الواقـع والتنبؤات النظرية لنماذج الانفجار العظيم.

وبعد استئناف الاتحاد دخل الكون فى عهد المادة، حيث بدأ يشبه مـا نـراه عليه حاليًا. وفقد الإشعاع الكهرومغناطيسى نفوذه لمصلحة المادة. ومـع اسـتمرار الكون فى التخفف والتبرد بدأ ينتظم. وعلى المستويات الصغيرة المكانية، تكونـت ذرات (عند استئناف الاتحاد)، وجزيئات، وبللورات، وغبار... وتجمع جـزء مـن هذه المواد، مع الغاز الموجود فى كل مكان (والهيدروجين بـشكل أساسـى) وأدى

---

(٥١)قوة الإشعاع luminosite: هى الطاقة التى يشعها نجم ما فى كل ثانية وتقاس بالإرج. (المترجم)

إلى نشوء مجرات، ونجوم، وكواكب، وركام مجرات.. حتى كل الأجرام التى يرصدها علماء الفلك فى الكون.

الهندسة الكونية

هذه هى قصة الكون من وجهة النظر الفيزيائية. ومع ذلك لا يوجد نموذج واحد للانفجار العظيم، ولكن فصيلة كاملة يتميز أفرادها بخواص محددة لهندساتها. فمن جانب تؤدى البيئة المكانية لهذه الهندسة إلى التمايز بين ثلاث فصائل تبعًا للانحناء المكانى السالب، أو المنعدم أو الموجب. وينشأ عن المكان ذى الانحناء الموجب، فى الأبعاد الثلاثة، سطح كرة. وينشأ عن المكان منعدم الانحناء ذى الأبعاد الثلاثة سطح مستوٍ. وهناك من جهة أخرى أماكن ذات انحناء سالب، وهى أقل شيوعًا. والأنواع الثلاثة قابلة للوجود، وعمليات الرصد هى وحدها التى تتيح التمييز. وتناظر الإثباتات الحديثة التى تبعًا لها "كان الكون مسطحًا" النوع المتوسط حيث المكان مسطح (وتتمايز نماذج الانفجار العظيم كذلك، من حيث إلمبدأ، بواسطة طبولوجيتها المكانية). فضلاً عن ذلك يمثل قانون التمدد الكونى الجزء الزمنى من هندسة الزمكان. ويبيِّن التمدد أن الزمكان لا يمكن أن يكون مستويًا، حتى لو كان المكان كذلك.

وتتيح النسبية العامة أيضًا، من حيث إلمبدأ، التنبؤ بمصير الكون. وهناك احتمالان ولا نعرف بعد أيهما هو الصالح. إما أن طور التمدد سيستمر بلا نهاية، أو أنه سينتهى وأن

الكون سيبدأ فى طور الانهيار من جديد على نفسه، وهى العملية العكسية للتمدد، التى ستؤدى إلى نهاية تكون فى مجملها مناظرة للانفجار العظيم، ويطلق عليها الانسحاق العظيم big crunch. ولا أحد يعرف ما سوف يحدث عندئذ، وهو ما لا يتجاوز جهلنا بما حدث فى اللحظات الأولى المبكرة تمامًا للكون الأولى. وربما يرتد الكون ليبدأ طور تمدد جديد. وربما ستكون تلك نهاية كل شىء، أو....

وتشير بعض الأدلة حاليا إلى أن التمدد قد يستمر إلى الأبد، بل قد يتسارع. لكن يجب التعامل مع كل هذه الاحتمالات بحذر شديد لأننا لا نعرف بعد بشكل دقيق ما هي النماذج، من بين قائمة نماذج الانفجار العظيم، التي ستكون ملائمة أكثر من غيرها لوصف كوننا. ويتباحث علماء الفيزياء الفلكية وعلماء الفلك حول انحناء وطبولوجيا الهندسة المكانية، وقيمة ثابت هابل الذي يقيس المعدل الحالي للتمدد، وحول الصيغة الدقيقة لقانون التمدد، متسارعًا أو متباطئًا، وحول مستقبله، هل هو أبدي أم ينتهي خلال انسحاق عظيم؟

والأكثر إثارة للدهشة هو بساطة هذه النماذج الكونية، خصوصًا البساطة الهندسية، القائمة على النسبية العامة. كيف لمثل هذه النماذج البسيطة أن تصف بهذه الجودة شيئًا بهذا التعقد مثل مجمل الكون؟ بالطبع يجب ألا ننتظر الإجابة عن هذا السؤال من النماذج نفسها. والبعض يغيب عن ذهنه هذا الأمر بسهولة إلى حد ما وينتقدون النماذج في هذا الشأن، وقد يكون الواجب انتقاد الفيزياء في مجملها كذلك، أو حتى العلم. وفي الحقيقة فإن محاولة فهم كيف يعمل نموذج ما يقتضي أن يُوظف في إطار أكثر عمومية، نوع من النموذج الفائق، نوع من النظرية الفائقة. ولدينا من جانب آخر تحفيزات أخرى لهذا الأمر لأن النظريتين الفيزيائيتين الأساسيتين، النسبية العامة و"الفيزياء" الكمية، غير متوافقتين في الوقت الراهن. إضافة إلى القلق من أن ذلك يحدث من وجهة نظر تصورية، تلك التي تمنع وصف الثقوب السوداء أو الكون البدائي. والبحث نشيط إلى أقصى درجة، من منظور نظرية أكثر جذرية من النسبية العامة أو الفيزياء الكمية، والتي سوف تتضمنهما لتكون كل منهما نوعًا من التقريب (تمامًا كما شملت النسبية العامة فيزياء نيوتن). وقد يؤدي ذلك إلى علم كون (كمي!) أكثر شمولية ربما يتيح لنا أن نفهم مصدر التأسيس الجيد لنماذج الانفجار العظيم. ولا تزال تلك النظرية الجديدة مجهولة حتى مع استكشاف ميادين مثيرة للاهتمام (علم الكون الكمي، والأوتار الفائقة، والتناظر الفائق...).

ما أصل الكون؟

لا يمكننى أن أتم كلامى دون إثارة السؤال حول أصل الكون، الذى يربطه الكثيرون بالانفجار العظيم. ولو أن الترابط غير واضح مع ذلك. وحيث إن الكون فى حالة تمدد، فكل الأبعاد الكونية تتزايد مع الزمن (ويتم تحديد الزيادة بالتطور الزمنى لعامل مقياسى facteur d`echelle: كل الأطوال الكونية تزداد مع الزمن متناسبة مع هذا العامل). وفى اتجاه الماضى الأولى يصبح هذا العامل أصغر فأصغر، حتى يبدو طبيعيًا أن نفكر فى أنه كانت هناك لحظة كان منعدما عندها. ويتم اعتبار هذه اللحظة تارة بأنها "أصل كل شيء"، ويطلق عليها أحيانًا الانفجار العظيم. والحق يقال لا تتنبأ الفيزياء ولا علم الكون إطلاقًا بهذه اللحظة. وتقضيان بلا ريب بأن العامل المقياسى وكل الأطوال الكونية كانت بالغة الصغر (بالمقارنة بما هى عليه حاليًا) لكنها لم تكن منعدمة. ولا يمكن وصف أية حادثة كانت مناظرة لانفجار كونى. ولا يمكن إعادة تصور الماضى للوصول حتى لحظة صفر افتراضية، لأن مستويات الكثافة والطاقة ودرجة الحرارة بالغة الارتفاع للكون الأولى تخرج عن إطار الفيزياء التى نعرفها: تتضمن أن التأثيرات الكمية والنسبية لا بد أنها كانت تعمل معا فى آن واحد، وهى حالة تعجز الفيزياء الحالية عن معالجتها (بسبب عدم التوافق المشار إليه). ومن المستحيل مد إعادة تصور الماضى إلى ما هو أبعد من "حاجز عدم المعرفة" (لا توجد أية حادثة كونية خاصة مُثبتة، ولكن المثبت حد جهلنا). ولقد أُطلق عليه اسم حاجز بلانك barriere de Plank، استنادًا إلى ثابت بلانك الذى يميز الظواهر الكمية.

وتقتضى الفيزياء الكمية أن كل مقدار ديناميكى يجب أن يتقلب. وتتضمن النسبية العامة أن المكان والزمن مقداران ديناميكيان. لذلك لا بد أن يتقلب كل من المكان والزمان، بما فى ذلك مستوى الكون فى مجمله (الذى كان متكدسًا جدًا فى ذلك العصر). ويمنع ذلك مثلاً معرفة ما إذا كانت حادثتان تقعان فى النقطة نفسها أم لا، وفى اللحظة نفسها أم لا، إذا كانت إحداهما تسبق الأخرى أو إذا كان

العكس. وتفقد هذه الأسئلة حتى معانيها، وهو ما يمنع وجود أى مـدخل فيزيـائى. وبدون التعريف الجيد للمكان والزمان، لا يمكن تأسيس فيزياء. وربما يتيح إطـارًا مختلفًا تمامًا، وما البحث عنه جارى أيضًا، العمل بدون زمان ولا مكان.

وليس هناك دائمًا سوى أن إعادة إنشاء ماضى الكون لا تقود إلى أى أصـل له، ولا إلى أى تخليق له. ويجب من جهة أخرى أن يجعلنا المنطق البسيط نحترس فى مواجهة المقارنة بين خلق الكون وبدايته الزمنية. وتبعًا لمفاهيمنا فـإن الـزمن جزء تأسيسى للكون، حتى وإن كان خلق الكون (إذا كان لهذا معنى) ينـدمج فيـه خلق الزمن. غير أنه لا يمكن أن يكون الزمن مخلوقًا فى قلب زمن سابق الوجود!

وقد يكون خلق الكون، إذا كان لا بد من التفكير فيه، هو خلـق للزمكـان، ومن ثم يكون المكان أيضًا زمنًا. ولا يمكن لخلق الكون أن ينبثق من الزمن، لذلك لا يمكنه إلا أن يكون زمنيًا. ولا يوجد أى شىء فى الفيزياء أو فى علم الكـون لا يسوغ الحديث حول لحظة خلق!

ورغم مستويات النجاح الهائلة لنماذج الانفجار العظيم، يجب علينا أن نظـل متواضعين: فعلم الكون والعلم بشكل عام، لن يقدما لنا أبدًا تبريرًا للعالم، وللمكـان الذى نحتله فيه.

المراجع:

- Luminet (J.-P.) et Lachièze-Rey (M.), *Figures du ciel*, Seuil, BnF, 1998.
- Lachièze-Rey (M.), *Initiation à la cosmologie*, Dunod, 1999.
- Koyré (A.), *Du monde clos à l'univers infini*, Gallimard, 1973.
- Lachièze-Rey (M.) et Gunzig (E.), *Le Rayonnement cosmologique*, Masson, 1995.
- Friedmann (A.) et Lemaître (G.), *Essais de cosmologie, l'invention du Big bang*, Seuil, Sources, 1997.
- Lachièze-Rey (M.), *Connaissance du Cosmos*, Albin Michel, 1987.
- Weinberg (S.), *Gravitation and cosmology*, John Wiley and Sons, New York, 1980.
- Demaret (J.), *Univers*, Le Mail, 1991.
- Gribbin (J.), *À la poursuite du Big bang*, Éditions du Rocher, 1991.
- Mazure (A.), Mathez (G.) et Mellier (Y.), *Chronique de l'espace-temps*, Masson, 1994.
- Merleau-Ponty (J.), *Cosmologies du xx^e siècle. Étude épistémologique et historique des théories de la Cosmologie contemporaine*, Gallimard, Paris, 1965.
- « Le Big bang en questions », *Science et Vie*, Hors série n° 189, décembre 1994.

الثقوب السوداء وشكل المكان[٥٢]

بقلم: جان - بيير لومينيه

Jean-Pierre LUMINET

ترجمة: عزت عامر

مقدمة

خلبت لبى مسألة شكل المكان منذ سن المراهقة عندما فتحت موسوعة عن علم الفلك فى الصفحة التى تعالج نظرية النسبية العامة لآينشتاين. وكان مكتوب فيها أنه فى المفيوم النسبى يكون للزمكان شكل حيوان من الرخويات. وكانت هذه الصورة تثير اهتمامى كثيرًا، ومنذ ذلك الحين لم أتوقف عن تفسير الألغاز المرتبطة ضمنيًا بهذا "الحيوان الرخوى الكونى". وعندما يتأمل أغلب الناس سماء ليلية صحوة لا يلفت أنظارهم سوى مشهد النجوم، أى "محتوى contenu" الكون. غير أنه يمكن للمرء أيضًا أن يندهش أمام "الحاوى contenant" غير المرئى: أليس المكان سوى وعاء خال وغير ممانع يتلقى الأجرام السماوية، أم من المستحسن أن نخصه بشكل، بهيئة، ببنية هندسية؟ هل هو مستو، منحن، خشن، أملس، محدب، متغضن،... إلخ؟

هل للمكان شكل؟

من الصعب دون شك بالنسبة للغالبية بينكم تخصيص شكل لشىء غير محسوس إلى هذه الدرجة وبهذا التجريد مثل المكان. وخلال قرون حاولت عدة مفاهيم فلسفية "إلقاء الضوء" على المكان باعتباره، مثلاً، مادة أثيرية لا تحتوى فقط على الأجسام المادية لكنها تؤثر فيها أيضًا وتشاركها فى عدد من خواصها البنيوية.

---

(٥٢)نص المحاضرة رقم ١٨٧ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٥ يوليو ٢٠٠٠.

إلا أنه بالنسبة لعالم الفيزياء لا تتعلق مسائل شكل المكان إلا باستخدام لغة الرياضيات، الأكثر تحديدًا من لغة الهندسة.

ما المكان الهندسى القادر على تمثيل المكان الفيزيائى؟

المسألة أكثر تعقيداً مما تبدو عليه للوهلة الأولى. بالطبع، المكان "المباشر" الذى يحيط بنا يوصف بدقة بالهندسة الإقليدية العادية. لكن المكان المجهرى (على مستوى بالغ الصغر) والمكان الكونى (على المقياس بالغ الضخامة) يختلفان عن المكان المباشر اختلافًا جذريًا. وبالنسبة لمسألة شكل المكان، تقدم الفيزياء المعاصرة فى هذه الحالة إجابات مختلفة، تبعًا لأربعة "مستويات" تعتمد على المستوى الذى نفحص فيه بنية المكان. المستويان "المتوسطان" ١ و٢ مفهومان إلى درجة كافية، والمستويان "المتطرفان" صفر و٣ يمثلان موضوع التأملات النظرية المبتكرة.

المستوى ١: الهندسة (شبه) الإقليدية.
مجال التطبيق: الميكانيكا الكلاسيكية،
النسبية الخاصة، والكهرومغناطيسية الكمية

على المقياس "المحلى" أى بين ١٠^-١٨ سنتيمتر (الطول سهل المنال حاليًا للاختبار) و١٠^١١ متر (فى إطار المسافة بين الأرض والشمس). ويتم التعبير عن هندسة المكان الفيزيائى بشكل جيد جدًا بالمكان الإقليدى العادى. ويعنى "جيد جدًا" أن هذه البنية الرياضية تخدم فى إطار طبيعى نظريات الفيزياء، التى تتيح مثل الميكانيكا الكلاسيكية، والنسبية الخاصة والكهرومغناطيسية الكمية، تفسيرًا دقيقًا لكل الظواهر الطبيعية تقريبًا. وللمكان فى هذه البنية ثلاثة أبعاد، دون انحناء. وفى النظرية النسبية يكون مقترنًا بالزمن فى قلب هندسة شبه إقليدية مسطحة رباعية الأبعاد، ويوصف بأنه "زمكان مينكوفسكى espace - temps de Minkowski".

المستوى ٢: الهندسة التفاضلية
فى مكان (شبه) ريمانى
مجال التطبيق: النسبية العامة، علم الكون

على المقياس الفلكى (المجموعة الشمسية، والنجوم، والمجرات، والكون كله). التفاعل الشائع الذى "ينحت" المكان الفيزيائى هو الجاذبية. ويوصف بالنسبية العامة، وتظهر له بنية غير إقليدية للزمكان. وتتيح الهندسة التفاضلية ذات التشكلات الريمانية riemanniennes الوصف الدقيق لهذه الأماكن المنحنية. وهناك العديد من النمذجة الممكنة، وعلى المقياس الكبير، مثلاً، يكون الانحناء "معتدلاً" ومنتظمًا. ومن ثم يعمل علماء الكون فى إطار مكان ذى انحناء ثابت. وفى جوار الأجرام السماوية شديدة الكثافة يمكن للانحناء على العكس أن يختلف بشدة بين نقطة وأخرى. وتعتبر هندسة شوارزشيلد Schwarzscild مثالاً لنمذجة الزمكان الفيزيائى حول ثقب أسود كروى.

المستوى صفر: هندسة متعددة الأبعاد
هندسة غير تبادلية،... إلخ
مجال التطبيق: نظريات التوحيد، الأوتار الفائقة، الجاذبية الكمية

يرتبط تعريف المكان على المقياس المجهرى (بين ١٠-٣٣ سنتيمترات و١٠-١٨ سنتيمترات) بالرهان الأكبر للفيزياء المعاصرة: توحيد التفاعلات الأساسية. وهو الذى يسعى إلى إجراء قران بين وجهتى نظر مختلفتين إلى أبعد حد: وجهة نظر ميكانيكا الكم، التى تصف التفاعلات بتعبيرات المجال، وتلك الخاصة بالنسبية، التى تصف الجاذبية بمصطلحات الانحناءات.

ولم تظهر أية نظرية مُرضية عن "الجاذبية الكمية"، لكن سيناريوهات متعددة كانت موضع الدراسة. وعلى أى حال فإن المفاهيم الهندسية المألوفة عن المكان والزمان مضطربة. فنظرية الأوتار الفائقة supercordes، مثلاً، تقدم أبعادًا مكانية

إضافية، وتصف الهندســة غيــر التبادليــة non commutative زمكانــا حبيبيًــا و"فضفاضًا flou"، وتصوّر الهندسة الديناميكية الكمية geometro _ dynamique quantique الزمكان على أنه محيط يفور بالطاقة، جــائش "بالموجــات "vagues (التموجات الكمية للفراغ) ومبقع "بــالرغوة ecume" (الأكــوان _ الفقــاقيع les univers _bulles).

المستوى ٣: الطبولوجيا، الأماكن "المدعوكة chiffonnes"،
مجال التطبيق: البنية الكلية للكون، الطبولوجيا الكونية

تفرض مسألة الشكل الكلى للمكان (على مقياس أعلــى مــن ١٠ [٢٥] متــر) مشاكل هندسية نوعية لا تتعلق بعد فقط بالانحنــاء، ولكــن أيــضًا بطوبولوجيــا الزمكان. وهذه المسألة ليست مدمجة لا فى النسبية العامة ولا فى المداخل الموحدة لفيزياء الطاقة العالية. ولفهم الصورة الرائعة "لكون حيوان الرخويــات" لا يتعلــق الأمر بعد بمعرفة ما إذا كان له حدبات أو تجويفات، ولكن معرفة ما إذا كان يتعلق بقوقع،[٥٣] أو بَزّاق،[٥٤] أو رخوية الحبر.[٥٥]

وظهر نظام جديد منذ عدة سنوات: الطبوغرافيا الكونية، التى تطبــق علــى النماذج الكونية النسبية الاكتشافات الرياضية التى تمــت فــى مجــال التــصنيف الطبولوجى للأماكن.

سوف تتقيد بقية المحاضرة على وجه الحصر بوصف المستوى ٢ فى سياق الثقوب السوداء، والمستوى ٣ فى سياق نماذج الكون المدعوكة.

---

(٥٣)قوقع escargot: أو حلزونة وهو حيوان من الرخويات المِعَدية، بعضه يربى ويؤكل. (المترجم)
(٥٤)بزّاق limace: حيوان رخوى متعدد الأنواع. (المترجم)
(٥٥)رخوية الحبر calmar: حيوان مائى ذو عشرة أذرع يفرز سائلاً أسود كالحبر ويؤكل. (المترجم)

الثقوب السوداء

تقول حكاية فارسية قديمة:

"في يوم ما عقدت الفراشات اجتماعا واسعا لأنها كانت منزعجة من لغز اللهب. وطرحت كل منها فكرتها عن هذه المشكلة. وقالت الفراشة العجوز الحكيمة التي تترأس الاجتماع إنه ليس لديها شيء مرض جديد بالاستماع، وأن أفضل موقف هو الذهاب لرؤية ما يكون عليه اللهب عن قرب.

طارت أول فراشة متطوعة إلى قصر مجاور ورأت لهب شمعة خلف نافذة. وعادت مستثارة جدا وحكت ما رأت. قالت الحكيمة إنها لم تخبرهن بشيء مهم.

اجتازت الفراشة الثانية النافذة ولمست اللهب، واحترق طرفا جناحيها. وعادت وحكت عن مغامرتها. قالت الحكيمة إنها لم تخبرهن بجديد.

ذهبت فراشة ثالثة إلى القصر وتلاشت في اللهب. وقالت الحكيمة، التي رأت المشهد عن بعد، إن الفراشة الوحيدة الميتة تعرف سر اللهب، وإنه ليس هناك ما يُقال".

تصور هذه القصة الرمزية لغز الثقوب السوداء. فهذه الأجرام السماوية تأسر المادة والضوء بلا أمل في عودتهما: ولو أن رائد فضاء جسورا جازف في ثقب أسود، فلن يستطيع أبدا الخروج لكي يسرد اكتشافاته.

الثقوب السوداء نجوم غير مرئية

تم ابتكار مفهوم النجم غير المرئي بواسطة عالمي فلك في نهاية القرن الثامن عشر، هما جون ميشيل John Michell (١٧٨٣) وبيير دو لابلاس Pierre de Laplace (١٧٩٦). وفي إطار نظرية الجاذبية الشاملة التي قدمها نيوتن، كان العالمان قد تساءلا حول إمكانية أن تكون في الكون نجوم بالغة الكثافة حتى إن سرعة الإفلات على سطحها يمكن أن تتخطى سرعة الضوء. وسرعة الإفلات هي

أدنى سرعة لازمة لإطلاق جسم حتى يمكنه الإفلات تمامًا من شـد الجاذبيـة لأى جرم سماوى. وإذا تجاوزت سرعة الضوء فإن الجرم يكون غير مرئى بالضرورة، حيث إنه حتى الأشعة الضوئية ستظل سجينة فى مجال جاذبيته.

لذلك فإن ميشيل ولابلاس وصفا النموذج الأولى الذى أُطلق عليه بعد ذلـك بوقت طويل (فى ١٩٦٨) اسم "ثقب أسود"، فى إطـار نظريـة أخـرى للجاذبيـة (النسبية العامة).

غير أنهما كانا قد حسبا وفرة "درجات الضخامة" التى تتسم بها حالة الثقـب الأسود. ولو أن جرمًا ذا كثافة متوسطة هى كثافة الماء (١ جم / سم٣) وكتلة أكبر عشرة ملايين مرة من كتلة الشمس لكان غير مرئى. ويُطلق على هذا الجرم حاليًا "ثقب أسود بالغ الكثافة". ويظن علماء الفلك أن هذه الثقوب موجـودة بالفعـل فـى مركز كل المجرات (ولو أنها قد لا تتألف من الماء (. وقد يكون الأكثـر شـيوعًا أيضًا "الثقوب السوداء النجمية"، التى تصل كتلة أى منها إلى بضعة كتـل شمسـية ونصف قطرها الحرج (أى نصف قطر شوارتزشيلد) إلى نحو عشرة كيلـومترات فقط. ولكى تتحول الشمس إلى ثقب أسود، يجب أن تتقلص إلى كرة نصف قطرها ٣ كيلومترات، أما بالنسبة للأرض، فيجب تكثيفها لتكون كرية سنتيمتر واحد.

الثقوب السوداء أشياء نسبية

لم تتطور نظرية الثقوب السوداء حقًا إلا فى القرن العـشرين فـى إطـار النسبية العامة. وتبعًا لمفهوم آينشتاين فإن المكان والزمان والمادة تقترن فى بنيـة هندسية غير إقليدية معقدة. وبتعبيرات مبسطة فإن المادة _ الطاقة تضفى، محليًـا على الأقل، شكلاً على الزمكان. ويمكن النظر للزمكان على أنه كيان جديد وهـو فى الوقت نفسه "مرن"، بحيـث إن الأجـرام الـضخمة تحـدث انحنـاء محليًـا، و"ديناميكيا"، أى بما يتيح لهذه البنية أن تتطور عبر الزمن، تحت تـأثير حركـات الأجرام الضخمة. وكل الأجرام الضخمة تُحدث حولها، مثلاً، فى النـسيج المـرن

للزمكان، انحناء، فلو انتقلت الأجرام من موضعها ينتقل معها الانحناء ويُحدث تموجًا فى الزمكان على هيئة تموجات يطلق عليه الموجات الجاذبة.

ويمكن تصور انحناء الزمكان بمسارات أشعة الضوء والجسيمات "الحرة"، التى تتخذ طبيعيًا شكل انحناء الزمكان. وإذا دارت الكواكب حول الشمس، مثلاً، لا يعود ذلك إلى أنها واقعة تحت تأثير قوة شد شاملة، كما تتطلب فيزياء نيوتن، لكن السبب أنها تتبع "الميل الطبيعى" للزمكان الذى ينحنى بالقرب من الشمس. وفى النسبية ليست الجاذبية قوة لكنها مظهر لانحناء الزمكان. لذلك فإن هذا الانحناء هو الذى يحفر "الشكل المحلى" للكون.

وتوضح معادلات آينشتاين كيف تعتمد درجة انحناء الزمكان على تركز المادة (بأوسع معنى للكلمة، أى بما يتضمن كل أشكال الطاقة). وتعتبر الثقوب السوداء النتيجة المنطقية لهذا الاقتران بين المادة والهندسة. ويشبه الثقب الأسود إلى ذلك الحد من الطاقة فى منطقة مغلقة من الكون الذى يمكنه حفر "بئر" حقيقى فى النسيج المرن للزمكان. وكل جسيم وكل شعاع ضوئى يخترق منطقة حرجة محددة بحافة (غير مادية) البئر، يتم أسره حتمًا.

كيف استطاعت الثقوب السوداء أن تتشكل؟

أدت نماذج التطور النجمى، التى تطورت طوال القرن العشرين، إلى مخطط عام لتطور النجوم تبعًا لكتلها. والمصير النهائى لأى نجم يتمثل دائمًا فى الانهيار الجاذبى لقلبه (مما يؤدى إلى "جثة نجمية")، الذى يصاحب انفجار طبقاته الخارجية.

وهناك ثلاثة أنواع من الجثث النجمية المحتملة:

– ينتهى أغلب النجوم (٩٩ فى المائة) إلى "أقزام بيضاء naines blanches"، وهى أجرام فى حجم الأرض لكن كثافتها أكثر مليون مرة، وتتكون بشكل رئيسى من الكربون المتحلل. وسوف تكون تلك حالة الشمس.

– تنفجر النجوم ذات الكتل الأكبر من كتلة الشمس عشر مرات (٩,٩ في المائة) على هيئة سوبرنوفا supernova. وتتقلص قلوبها إلى كرة نصف قطرها ١٥ كيلومترًا، "نجمًا من النوترونات" ذى كثافة خرافية. ويمكن رصدها على هيئة بولسارات pulsars، وهى أجرام شديدة المغنطة وتدور بسرعة وتتغير قوة إشعاعها الراديوى بشكل دورى.

– وفى النهاية إذا بدأ النجم بكتلة أكثر ٣٠ مرة من الكتلة الشمسية، فإن نواته مقضى عليها بأن تنهار بلا حدود لتكوين ثقب أسود. ومن المعروف بالفعل أنه لا يمكن لنجم نيوتروني أن يتخطى كتلة حرجة مقدارها تقريبًا ثلاثة أضعاف كتلة شمسية. والنجوم الضخمة جدًا نادرة إلى حد بعيد: نجم من بين كل ألف في المتوسط. وكما أن مجرتنا تأوى نحو مائة مليار نجم، من هنا يمكن أن نتوقع أن يتكون فيها نحو عشرة ملايين ثقب أسود نجمى.

أما بالنسبة للثقوب السوداء بالغة الثقل، فمن الممكن أن تنشأ، سيان من انهيار جاذبى لركام نجوم فى مجمله، أو من نمو ثقب أسود "بذرة" ذى كتلة ابتدائية متواضعة.

كيف تُكتشف الثقوب السوداء؟

يمكن اكتشاف بعض الثقوب السوداء بشكل غير مباشر إذا لم تكن معزولة، وإذا كانت تبتلع المادة بكميات كافية. والثقب الأسود الذى يمثل جزءًا من زوجين نجميين، مثلاً، يمتص الغلاف الغازى للنجم المرافق له. ويسخن الغاز بشدة قبل أن يختفى، ويبث قوة إشعاع مميزة فى نطاق الإشعاعات ذات الطاقة العالية. وتبحث تلسكوبات الأشعة السينية الموجودة فى قمر صناعى عن هذه الثقوب السوداء النجمية فى منظومات النجوم المزدوجة ذات قوة الإشعاع السينى المتغيرة بشدة. ويوجد فى مجرتنا بمفردها نحو اثنى عشر من هذه الأجرام "المرشحة" لأن تكون نجومًا سوداء.

وتوضح لنا الأرصاد الفلكية أيضا أن الثقوب السوداء بالغة الثقل توجد على الأرجح فى مركز العديد من المجرات _ ومنها مجرتنا. ويفسر نموذج "الثقب الأسود المجرِّى" بشكل خاص قوة الإشعاع غير العادى الذى أطلقته المجرات التى يُطلق عليها "ذات النواة النشيطة a noyau actif"، والأكثر إثارة للذهول من بينها هى الكازارات quasars، وهى أجرام ذات قوة إشعاع ذاتى يتيح سبر تخوم الكون.

فى عام ١٩٧٩ كان أول عمل لى فى الأبحاث يشتمل على إعادة التمثيل رقميًا لظهور ثقب أسود يحيط به قرص غازى ساخن. وكانت التعوجات فى الزمكان بالقرب من الثقب الأسود من الضخامة حتى إن الأشعة الضوئية اتخذت شكل مسارات منحنية بشدة مما أتاح، مثلاً، الرصد فى الوقت نفسه لما فوق القرص وما تحته. ثم درست طريقة تهشم نجم يحتك بثقب أسود عملاق، بواسطة قوى المد والجزر. ويحدث مط للمكان بحيث يتسطح النجم بعنف، فى عدة ثوان، على هيئة "كريب[٥٦] مشتعل".. ويمكن لأنقاض النجم بعد ذلك أن تغذى بنية غازية حول الثقب الأسود وأن تطلق طاقة على المدى البعيد. وظاهرة الكريب النجمى هذه التى توضحها الحسابات الرقميةلم يتم رصدها بعد، لكنها تمثل تفسيرا محتملاً لطريقة تغذية مجرات بنواة نشيطة.

الفيزياء الخارجية للثقوب السوداء

تطورت نظرية الثقوب السوداء جوهريًا فى الستينيات والسبعينيات. والثقب الأسود، مثل كل الأجرام، يدور حول نفسه. ويمكن تصوره على أنه "دوامة كونية" تجر الزمكان خلال دورانها. وكما هو الأمر فى حالة إعصار بحرى، إذا دنت سفينة فضائية لتصبح قريبة جدًا، تبدأ بسبب انعدام مقاومتها فى الانجذاب فى اتجاه الدوران، وإذا اجتازت منطقة حرجة حيث لا عودة، تسقط حتمًا فى عمق الدوامة.

---

(٥٦)كريب crepe: قماش رقيق مجعد، وهناك أيضا كريب الصين الحريرى الرقيق. (المترجم)

ويكون الزمن أيضًا مشوهًا فى موضع الثقب الأسود. والـــزمن "الظـــاهرى" الذى يتم قياسه بأية ساعة خارجية، يتباطأ بلا نهاية، بينما الزمن "الصحيح"، الـــذى يتم قياسه بواسطة ساعة فى حالة سقوط حر، لا يعد سوى بضعة ثـــوان إلا وقـــد تلاشت الساعة فى عمق الثقب. وإذا كان يتم تصوير رائد فضاء خلال سقوطه نحو ثقب أسود، لما رآه أحد أبدًا وهو يصل إلى السطح، وقد تتجمد الصور إلـــى الأبـــد فى اللحظة التى يبدو فيها رائد الفضاء وقد بلغ حدود الثقب الأســـود. وفـــى هـــذه الحالة، وتبعًا لساعته الخاصة، فإن رائد الفضاء قد يكون ابتلع تمامًا بواسطة الثقب فى بضعة لحظات.

والنظرية الرئيسية فى فيزياء الثقوب السوداء مُصاغة بطريقة رائعة: "لـــيس للثقب الأسود شَعر". وهذا يعنى أنه متى اختفت المادة _ الطاقة فى داخـــل الثقـــب الأسود، فإن كل خواص المادة مثل اللون، الشكل، والتركيب إلـــخ... تختفـــى، ولا يبقى سوى ثلاث خواص: الكتلة، والعزم الزاوى moment angulaire والـــشحنة الكهربائية. لذلك فإن الثقب الأسود فى حالة التوازن هو الموضوع الأكثر "بـــساطة" لكل الفيزياء، لأنه محدد بشكل كامل بهذه البارامترات parametres الثلاثة. وفـــى الوقت نفسه فإن كل الحلول الصحيحة للنظرية النسبية التى تصف بنية الزمكـــان، الناتج عن ثقب أسود، معروفة وتمت دراستها بشكل كثيف.

والثقب الأسود، حتى بطبيعته، مكرس حتمًا للنمو. غير أن النظرية شـــهدت طفرة مثيرة للاهتمام فى بداية الثمانينيات، عندما اكتشف ستيفن هـــوكنج Stephen Hawking أن الثقوب السوداء "المجهرية" (من المفترض أنها تكونت عند الانفجار العظيم) قد تصرفت بعكس الثقوب السوداء الضخمة. وإذا تم التعامـــل مـــع هـــذه الثقوب الصغيرة جدًا، التى تكون فى حجم جسيم أولى لكن فى كتلة جبل، بالفيزياء الكمية وليس فقط بفيزياء الجاذبية، فإنها قد تتبخر لأنها كانت أساسًا غير مـــستقرة. وأيضًا تثير ظاهرة "التبخر الكمى evaporation quantique" هـــذه الكثيـــر مـــن التساؤلات. ولم يتم رصد أى ثقب أسود بالغ الصغر، لكن دراستها النظريـــة تتـــيح

نسج روابط بين الجاذبية والفيزياء الكمية. وترى بعض النماذج الحديثة أن نتيجة تبخر ثقب أسود قد لا تكون مفردة singularite مشابهة لنقطة "مجردة"، ولكن وتر corde _ وهو أداة نظرية سبق أن استعانت بها نظريات توحيد التفاعلات الأساسية.

داخل الثقوب السوداء

هل الآبار المحفورة بواسطة الثقب الأسود في النسيج المرن للزمكان "ممسوكة" بعقدة انحناء لانهائي _ وفي هذه الحالة فإن كل المادة الساقطة في الثقب الأسود تتكدس بلا نهاية في مفردة؟ أم أن غور الثقب الأسود "مفتوح" تجاه مناطق أخرى من الزمكان بواسطة أنواع من الأنفاق؟ وكانت بعض الحلول الرياضية للنسبية قد أوحت بهذا الاحتمال الثاني، الذي يبدو ظاهريًا بالغ الغموض. وقد يكون ثقب دودي trou de ver بنية طبولوجية غريبة تشبه "قبضة زمكان" تربط بين منطقتين في الكون، حيث إحداهما ثقب أسود والأخرى ثقب أبيض. ولقد فتنت تلك الاختصارات للزمكان، التي قد تتيح قطع ملايين السنوات الضوئية خلال بضعة أجزاء من الثانية، دون تجاوز سرعة الضوء مطلقًا، علماء الفيزياء وكذلك مؤلفي الخيال العلمي. وتشير دراسات أكثر تفصيلاً إلى أن هذه الثقوب الدودية لا يمكن أن تتشكل خلال الانهيار الجاذبي لنجم: وبمجرد تكوّنها قد تتحطم وتنغلق قبل أن يكون لدى أي جسيم وقت لأن يعبرها. وتشير بعض النماذج إلى أن الثقوب الدودية يمكن أن توجد مع ذلك على مقياس مجهري. وفي الواقع، يمكن للبنية الأكثر حميمية للزمكان أن تتشكل من رغوة دائمة التقلب من ثقوب سوداء بالغة الصغر، وثقوب بيضاء بالغة الصغر وثقوب دودية صغيرة، تعبرها بطريقة خاطفة جسيمات أولية ربما يمكنها أن ترجع في مجرى الزمن.

الشكل الكلى للكون

على مستوى علم الكون يجب تصور "النسيج المرن "tissu élastique للزمكان كما لو كان مملوءًا بعدد كبير من الكرات الصغيرة _ نجوم، مجرات، ركام مجرات _ موزعة بطريقة أكثر أو أقل تجانسًا وتنسيقًا. ومن ثم يكون الانحناء الناتج عن توزيع الأجرام منسقًا هو الآخر، أى ثابت فى الفضاء. ومن جانب آخر فإن توزيع المادة الكونية وحركتها يكسبان الزمكان "ديناميكا" كلية: فالكون إما فى حالة تمدد وإما فى حالة تقلص.

ويرتكز علم الكون النسبى على البحث عن حلول صائبة للاحتمالات النسبية لوصف بنية الكون وتطوره على المقياس الكبير. وكانت نماذج الانحناء المكانى الثابت قد اكتشفت بواسطة ألكسندر فريدمان Alexandre Friedmann وجورج لاميتر Georges Lemaitre فى العشرينيات. وتتميز هذه النماذج بانحنائها المكانى وديناميكيتها.

وفى أبسط نص لها:

مكان ذو انحناء موجب (النموذج الكروى).

يتمدد المكان ذو الحجم المحدود (ولو فى التخوم) فى البداية انطلاقًا من مفردة ("الانفجار العظيم" المشهور)، ويصل إلى أقصى نصف قطر، ثم يتقلص لينتهى إلى "انسحاق عظيم". والعمر النموذجى لنموذج الكون هذا يقترب من مائة مليار سنة.

– انحناء المكان منعدم (النموذج الإقليدى) أو سالب (النموذج ذو المقطع الزائد).

وفى الحالتين يتتابع تمدد الكون دائمًا انطلاقًا من انفجار عظيم ابتدائى، ولكن معدل التمدد يتباطأ بمرور الزمن.

وتتغير تمامًا هذه الديناميكا السابق ذكرها إذا أضيف حد يطلق عليه "الثابت الكونى constante cosmolgique" إلى المعادلات النسبية. ويؤثر هذا الحد على تسارع معدل التمدد، بطريقة يمكن أن تجعل حتى المكان من النوع الكروى "مفتوحًا" (أى يكون فى حالة تمدد دائم)، إذا كان له ثابت كونى كبير بما فيه الكفاية. وتشير أرصاد حديثة إلى أن المكان الكونى يقترب من أن يكون إقليديًا (بطريقة تجعل البديل الكروي/زائدى المقطع لا يتمايز البتة)، لكنه يكون فى حالة تمدد متسارع، وهو ما ينزع إلى تصحيح الثابت الكونى (بشكل يرتبط بطاقة الفراغ).

لن أتوسع أكثر من ذلك فى هذه المسألة، لأنها مدرجة فى برنامج المحاضرة ١٨٦ لجامعة كل المعارف التى يقدمها ماريه لاشييز _ رى Mare LACHIEZE REY _.

ما الفرق بين الانحناء والطبولوجيا؟

هل لدينا، بالاستعانة بعلم الكون النسبى، وصف لشكل المكان على المقياس الكبير؟ يمكن الرد بالإيجاب للوهلة الأولى، لكن ذلك ليس لدينا. وحتى السؤال حول نهائية ولانهائية المكان (الأكثر فظاظة من ذلك الذى يتعلق بشكل المكان) لم يُبت فيه بوضوح. وفى الواقع، لو لم تتضمن الهندسة الكروية سوى أماكن بحجم محدود (مثل الكرة الزائدة hypersphere) فإن الهندسة الإقليدية وهندسة القطع الزائد تتوافقان بقدر ما مع الأماكن النهائية وكذلك مع الأماكن اللانهائية. والطبولوجيا، هذا الفرع من الهندسة الذى يتعامل مع بعض الأشكال الثابتة للأماكن، هى الوحيدة التى تتيح معلومات إضافية عن البنية الكلية للمكان _ معلومات لا يمكن للانحناء (وبالتالى النسبية العامة) بمفرده أن يزودنا بها.

ولإثبات أن مكانًا ما إقليديًا "محليًا" (منعدم الانحناء) يكفى التحقق من أن مجموع زوايا أى مثلث 180° بالضبط - أو، وهو ما يصل إلى النتيجة نفسها،

التحقق من نظرية فيثاغورس Pythagore، فإذا كان هذا المجموع أكبر من °180 فإن المكان يكون محليًا كرويًا (الانحناء موجب)، وإذا كان هذا المجموع أقل من °180، يكون المكان محليًا قطعًا زائدًا (انحناء سالب).

غير أنه ليس من الضرورة أن يكون المكان الإقليدى بهذه البساطة كما قد نظن. مثال لذلك فإن مكانًا إقليديًا (له بعدان فى هذه الحالة) ليس من الضرورى أن يكون سطحًا. ويكفى قص شريط فى السطح ولصق طرفيه للحصول على أسطوانة. وفى هذه الحالة تتحقق لهذا السبب نظرية فيثاغورس على سطح الأسطوانة كما هو الحال فى السطح الأصلى. ومن ثم فإن الأسطوانة تعتبر بالضبط سطحًا إقليديًا ذا انحناء منعدم، حتى لو كان تمثله فى المكان (الوهمى) البصرى يبدو منحنى "ظاهرًا". ومع أن الأسطوانة إقليدية، إلا أنها تبدى اختلافًا جوهريًا بينها وبين السطح: فهى منتهية فى اتجاه ما. وهذا هو نوع الخواص الذى ينتج عن الطبولوجيا، وليس عن الانحناء. وعند قص السطح ومع لصقه وفق أوضاع محددة لا نكون قد غيرنا شكله المحلى (انحناءه) لكننا نكون قد غيرنا شكله الكلى بطريقة جذرية (طبولوجيته). ويمكننا الانطلاق أبعد من ذلك إذا قصصنا الأسطوانة على هيئة أنبوب ذى طول محدود، ثم لصقنا الطرفين الدائريين. سنحصل على "طوق منبسط tore plat"، أى سطح إقليدى بدون انحناء، لكنه مغلق فى كل الاتجاهات (سطح محدود). ولو أن بكتيريا تعيش على سطح طوق منبسط فإنها لن تهتم بالفرق بينه وبين سطح عادى، على الأقل فى حالة انتقالها وقيامها بجولة كاملة على الطوق. وفى الأبعاد الثلاثة من الممكن التسليم بهذا النوع نفسه من الأعمال. وانطلاقًا من مكعب فى المكان الإقليدى العادى، ومع مطابقة زوج ثم زوج من أسطحه المتواجهة، ينتج "طوق زائد"،[٥٧] مكان إقليدى محليًا لحجم محدود.

---

(٥٧)طوق زائد hypertore: والطوق tore سطح متكون من دوران دائرة حول محور فى مستواها لا يتقاطع وإياها. (المترجم)

من وجهة النظر الطبولوجية، يعتبر السطح والمكان الإقليدى أحادِيى الاتصال monoconnexes، أما الأسطوانة والطوق والطوق الزائد فهى متعددة الاتصال multiconnexes. وفى المكان وحيد الاتصال، أى نقطتين تتصلان بواسطة خط جيوديزى[٥٨] وحيد (المتكافئ مع مستقيم فى المكان المنحنى)، بينما فى المكان متعدد الاتصال تصل كمية لا متناهية من الخطوط الجيوديزية بين نقطتين. وتعطى هذه الخاصية للأماكن متعددة الاتصال فائدة استثنائية فى علم الكون. وتتبع الأشعة الضوئية، فى الواقع، الخطوط الجيوديزية للزمكان. وعندما نرصد مجرة بعيدة تكون لدينا عادة الظن بأننا نراها على هيئة نموذج فريد، فى اتجاه معطى وعلى مسافة معطاة. وفى هذه الحالة لو كان المكان الكونى متعدد الاتصال، سيكون هناك تخفيف لسرعة مسارات الأشعة الضوئية، مما ينتج عنه صور متعددة للمجرة المرصودة. وكما هو الحال مع مداركنا عن المكان الناتجة عن تحليل مسارات الأشعة الضوئية، إذا كنا نعيش فى مكان متعدد الاتصال سنقع فى وهم بصرى كبير يجعل الكون يبدو لنا أكثر ضخامة مما هو عليه، والمجرات البعيدة التى نظنها "أصلية" تكون فى الواقع صورًا متعددة لمجرة واحدة، أكثر قربًا فى المكان وفى الزمن (الشكل ١).

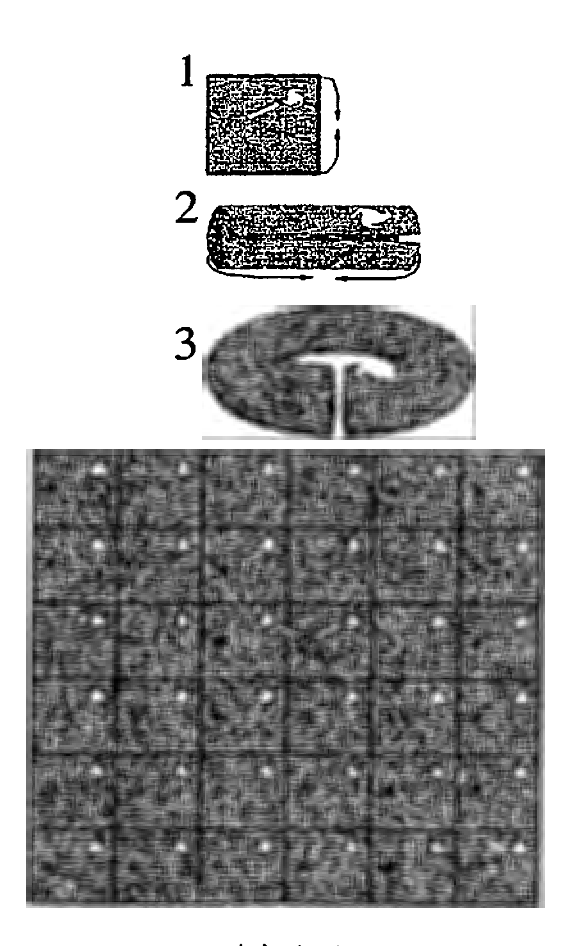
وتتيح نماذج "الكون المتجعد univers chiffonne" الحصول على حلول كونية يمكنها، مهما كان انحناؤها، أن تكون محدودة أو لانهائية، وتوصف بأشكال (طوبولوجية) بقدر كبير من الدقة. ويمكن استخدام هذه النماذج على الوجه الأكمل لوصف شكل المكان على مستوى كبير جدًا. والمكان المتجعد هو مكان متعدد الاتصال له حجم محدود، على مقاس أصغر من الكون المرصود (الذى يكون نصف قطره الظاهر نحو ١٥ مليار سنة ضوئية).

---

(٥٨) خط جيوديزى geodesique: أقصر خط بين نقطتين معينتين على سطح. (المترجم)

وينتج عن الأماكن المجعدة "وهم طوبولوجي خادع" يخفف سرعة صور المصدر الضوئي. وبعض الأوهام الكونية الخادعة أصبحت معروفة جيدًا لدى علماء الفلك تحت اسم "الأوهام الخادعة للجاذبية". وفي هذه الحالة يؤدي انحناء المكان بالقرب من الأجرام الثقيلة الواقعة على خط رؤية جرم أكثر بعدًا، إلى تخفيف سرعة مسارات الأشعة الضوئية

الصادرة من الخلفية. لذلك نستقبل صورًا وهمية تجمعت من جديد في اتجاه الأجرام السماوية التي تتوسط بيننا وبين الأجرام المرصودة، ويطلق على هذا الجرم المتوسط "العدسة lentille". ويعود هذا النوع من الوهم الخادع إلى الانحناء "المحلي" في المكان حول العدسة.



الشكل (١)

كون بسيط جدًا فى بعدين يوضح كيف يمكن لراصد موجود فى مجرة A (الداكنة) أن يرى صورًا متعددة للمجرة B (باللون الفاتح). ونموذج الكون هذا الذى يسمى طوقًا، ناشئ انطلاقًا من مربع تم "لصق" الحرفين المتواجهين فيه: كل ما يبرز من جانب يظهر من جديد فى الحال فى الجانب المقابل، فى نقطة مناظرة.

ويمكن لضوء المجرة B أن يصل إلى المجرة A تبعًا لعدة مسارات، بحيث يرى الراصد فى المجرة A صورًا للمجرة B تصل إليه من عدة اتجاهات.

ولو أن المكان على هيئة طوق محدود، غير أن الموجود فيه يتعرض لخداع رؤية مكان غير محدود (عمليًا تحد الآفاق من الرؤية)، أضخم بكثير مما هو عليه في الواقع. وهذا المكان الوهمي من منظور شبكة نشأ انطلاقًا من خلية أساسية، التي تكرر إلى ما لا نهاية كل شيء في الخلية.

وفي حالة الوهم الطوبولجي الخادع ليس هناك جرم محدد هو الذي يغيِّر شكل المكان، لكن المكان نفسه هو الذي يقوم بدور العدسة. وينتج عن ذلك أن الصور الوهمية تكون قد توزعت في كل اتجاهات المكان وكل شرائح الماضي. ويتيح لنا هذا الوهم "الكلي" رؤية الأجرام ليس فقط في كل اتجاهاتها الممكنة، ولكن أيضًا في كل أطوار تطورها.

الاختبارات الرصدية للكون المتجعد

إذا كان الكون متجعدًا، فإن ذلك يحدث لشكله الدقيق ولشكله على المقياس بالغ الضخامة، غير أننا سبق أن تحققنا من وجود صور غامضة لمجرتنا والبنى الأخرى المعروفة جيدًا. فإذا لم يكن الأمر بهذا الشكل، كيف يتم كشف طوبولوجيا الكون؟ لقد تم تطوير طريقتين للتحليل الإحصائي مؤخرًا، إحداهما علم التبلر الكوني cristallographie، الذي يحاول كشف بعض التكرارات في توزيع الأجرام البعيدة، وتدرس الطريقة الأخرى توزيع تموجات درجة حرارة الإشعاع الأحفوري. وقد يتيح هذا الأثر البارد للانفجار العظيم، إذا كان المكان متجعدًا، إبراز الترابط الخاص المتبادل بين أزواج الدوائر التي تكون تغيرات درجات الحرارة الكونية عبرها، هي نفسها بين نقطة وأخرى.

ويجرى إنشاء مشاريع تجريبية في مجال علم التبلر الكوني واستكشاف أزواج الدوائر المترابطة. وفي الوقت الحالي ليس عمق الأرصاد ووضوحها كافيين للحصول على نتائج حول الطبولوجيا الشاملة للمكان. لكن السنوات المقبلة سوف تفتح إمكانيات جذابة، حيث ستتيح في الوقت نفسه سبر أغوار إحصاء عدد

كبير جدًا من الركام البعيد للمجرات والكازارات، وقياس الإشعاع الأحفوري بأعلى وضوح زاوي. عندئذ ربما يكون لدينا شكل للمكان.

المراجع:

- LUMINET (J.-P.), *Les Trous noirs*, Le Seuil/Points Sciences, 1992.
- LUMINET (J.-P.), *L'Univers chiffonné*, Fayard, 2001.

مجرى الزمن وسهمه(٥٩)

بقلم: إتيين كلين

Etienne KLEIN

ترجمة: عزت عامر

قليل من الشعر فى البداية

يرجع إلى عالم فيزياء بريطانى، هو أرثر إدنجتون Arthur Eddington، فكرة أن الزمن لا بد أن يكون له (منذ ١٩٢٩) رمز، هو السهم، وهو ما تُرجعه الأساطير حتى ذلك الحين إلى إيروس Eros، إله الحب، الذى يتم تصويره على هيئة طفل ممتلئ الجسم ذى أجنحة يصيب القلوب بأسهمه المثيرة. ولم يعد سهم الزمن يرمز إلى أمنية الحب، واحسرتاه، لكنه يعبر عن الإحساس المأساوى الذى نكابده جميعًا بسبب الانقضاء المحتوم للزمن. وبالنسبة لعلماء الفيزياء، يتم التعبير عن الزمن بلا معكوسية عدد من الظواهر الفيزيائية. ويتميز عن "مجرى" الزمن نفسه، ومع ذلك كثيرًا ما يحدث الخلط بينهما.

وقبل الدخول فى صميم الموضوع أود أن أقدم لكم بضعة جمل لكتّاب أو شعراء، ذكر كل منهم بطريقته، مجرى الزمن أو سهمه أو خليطًا من الاثنين.

فلنبدأ بساشا جويترى Sacha Guitry: تأخرت السيدة. هذا يعنى أنها على وشك المجيء". هذا هو مجرى الزمن المذكور هنا، بطريقة غير مأساوية لكنها معادية للنساء بقسوة. إذا واصلنا مع جورج بيروس Georges Perros، مؤلف "أوراق ملتصقة Papiers Colles": "تدق الساعة. هذا هو الوقت الذى يجس نبضه". ها هى بلا شك طريقة أكثر حيادية للتعبير عن حادثة أن الزمن يمر

(٥٩)نص المحاضرة رقم ١٨٨ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٦ يوليو ٢٠٠٠.

والقول بأن له مجرى محددًا جدًا. فإذا تابعنا مع روبرت ديسنوس Robert Desnos: "الورقة التى تسقط والعجلة التى تدور تقول لك إنه لا شيء دائم على الأرض". هذه الجملة تحسن التعبير عن فكرة زمنية هذا الانتهاء. وغرز تريستان تزارا Tristan Tzara، وهو شاعر سريالى آخر، مسمارًا بطريقة تثير قشعريرة فى الظهر: "أتذكر ساعة حائط تخترق الرءوس لتدل على الأوقات". هذه هى علاقة الزمن باللامعكوسية وبالموت. ومن المستبعد أننا قادرون على قتل الوقت، إنه هو الذى يفترسنا. من جهة أخرى كانت العصور القديمة تقرن الكوكب زحل بالجبار القاسى كرونوس Kronos الذى كان يلتهم على التوالى أبناءه الذين كانت تضعهم زوجته ريا Rhea. وحيث إن المسألة لم تعد حاليًا الغرق فى اللذة الكئيبة بالإفراط فى الربط المباشر بين الزمن والموت، سننهى هذه المقتطفات بكلمات لجورج لويس بورخيس Jorge Luis Borges (فى ألف Aleph)، التى تقول بأن قيمة الحياة، الحياة كقيمة، تكمن تمامًا فى معرفة عرضيتها الجوهرية: "يجعل الموت البشر أعزاء ومثيرين للشجون. ويعبرون عن حالة أوهامهم، ويتصرف كل منهم كما لو أنهم ينجزون آخر أعمالهم، ولا وجه إلا وينجلى فورًا عن ما يشبه وجه الحلم. والكل عند الكائنات الفانية له قيمة ما لا يمكن تعويضه وما هو فى نطاق الاحتمالات".

ما الزمن؟

أفكارنا عن الزمن تكون دائمًا على وجه التقريب مضطربة، ولا شك أن سبب ذلك هو أننا لا نعرف الكثير عن نوع الموضوع الذى يعالجه. هل الزمن شيء؟ هل هو فكرة؟ هل هو هيئة؟ ألا يكون مجرد كلمة؟ هل يوجد خارج "الروح"، تبعًا لتعبير القديس أوغسطين Augustin؟ هل هو نتاج "الوجدان" كما يقول هوسيرل Husserl؟ من الصعب الإجابة عن هذه الأسئلة، لكن يُعتقد فى أكثر الأحيان أن العلماء، وخاصة علماء الفيزياء، سيكون فى استطاعتهم فى يوم ما أن يكشفوا لنا عن طبيعة الزمن، أو على الأقل أن يقدموا له تعريفًا سيكون أكثر

صوابًا من التعريفات الأخرى. ويتعلق الأمر دون شك بسوء فهم مـــا، لأنـــه مـــن الصعب دائمًا تعريف الكلمات المهمة. ربما أو حتى قد يكون من المستحيل فى هذه الحالة، إذا كانت هذه الكلمات جوهرية حقًا، ألا نستطيع أن ننسبها إلى شىء آخـــر غير نسبتها إلى نفسها. والتعريف، قبل أى شىء، هو رد مفهوم مغطى إلى مفهـــوم آخر أكثر جوهرية. ولكن ما الذى يكون أكثر جوهرية من ذلك الذى سبق لـــه أن كان جوهرياً؟ لا يوجد، وهذا دون شك هو سبب أن الفيلـــسوف مـــارتين هـــدجر Martin Heidegger كان محقًا عندما لاحظ أن العلماء يطرحون فى النهاية القليل جدًا من الأسئلة مثل "ما الزمان؟"، "ما المكان؟"، "ما المادة؟"، بينما تكون الإجابـــة عن هذه الأسئلة غالبًا هى ما نتوقعه منهم هم أنفسهم.

وغالبًا ما ننسى أن قوة الفيزياء تأتى من أنهـــا عرفـــت كيـــف تحـــد مـــن طموحاتها. فهى لا تهتم بكل الأسئلة التى تدور فى عقولنا، بعيدًا عن خطـــأ هـــذه الأسئلة. وتعهدت بألا تختار سوى تلك الأسئلة التى تكشف عن جدارتها وعن منهج الفيزياء. فهى لا تحاول، مثلاً، حل مسألة "طبيعة" الزمن، أو على الأقل لو فعلـــت ذلك فإنه يكون فقط على هامش نظرياتها. وهى بالأحرى تبحـــث عـــن الطريقـــة الأفضل لرمز الزمن، وهو أمر مختلف تمامًا.

فلنركز قليلاً فى المسألة الشائكة لتعريف الزمن. كل منا يدرك ما يرغب أحد فى قوله عندما يلفظ بكلمة الزمن، لكن لا أحد يعرف حقًا أى حقيقة تختفى خلف هذه الكلمة. وإذا كانت الكلمة واضحة، فإن ما تشير إليه لن يكون كذلك. يمكـــن بالتأكيـــد محاولة تعريف الزمن وهو ما لم يغب فعله عن الفلاسفة: الزمن هو ما يمر عنـــدما لا يحدث شىء، إنه ما يفعل، كل ما يُفعل أو لا يُفعل، إنه نظام تعاقب الأحداث، هـــو عدد الانتقالات تبعًا لقبل وبعد، إنه الصيرورة الآخذة فى الحدوث. لكـــن كـــل هـــذه التعبيرات مازالت تتضمن فكرة الزمن (مثلا فكرة "مجرى" تفتـــرض فكـــرة وجـــود زمنية، أى شىء ما يجرى). ومن ثم فإنها ليست سوى تعبيرات مجازية عن الزمن، عاجزة عن أخذ طبيعته الحقيقية فى الاعتبار. وليس هذا أمر شديد الجـــسامة، لأنـــه

ليس من الضرورى تعريف الزمن لتقديم رمز عنه. حقًا لقد وُفق علماء الفيزياء فى تقديم مفهوم عملى عن الزمن دون أن يستطيعوا تعريفه بدقة.

الفيزياء والزمن

هنا يتضح مصدر التناقضات، ولم يتوقف الفلاسفة عن طرح الأسئلة حول حقيقة الزمن، ويحدث ذلك منذ العصر اليونانى القديم. فالنتابع مثلاً الحل المقدم من بارمينيدس Parmenide والإيليين،[٦٠] الذين اقترحوا دمج المادة والمكان، مما يستبعد بنفسه الفراغ، والذين وجدوا أنفسهم مجبرين على التفكير فى الحركة على أنها انتقال بسيط، أى باعتبارها سلسلة متوالية من أوضاع ثابتة. وفى الوقت نفسه ظل الزمن غامضًا بالنسبة لهم، ولهذا السبب ثابروا على البرهنة على استحالته ووصفه بكليته انطلاقًا من السكون. فلنتابع أيضًا هيريقليدس Heraclite والذريين atomistes، الذين اتخذوا قرارًا آخر: اقترحوا دمج المادة مع الحركة وأثبتوا واقعية الفراغ. وتبعًا لهم فإن كل شىء يتحرك، يتحرك إلى درجة أنه لا يمكن تخيل نقطة ثابتة لتقدير تغيرات حالة ما ولا تفسير هذا الأمر.

وكان تأثير بارمينيدس بالغ القوة على الفيزياء. حقًا لقد كانت الفيزياء تسعى منذ وقت طويل إلى استبعاد الزمن. فالزمن مقترن بالمتغير، وبغير المستقر، وبالزائل، بينما الفيزياء، فى حد ذاتها، يُقال عنها إنها تسعى إلى الروابط التى تكون مبنية على التغير. وحتى لو كانت الفيزياء تنطبق على عمليات لها تاريخ أو تطور، فإن ذلك لكى تميز المواد والأشكال، أو القوانين والقواعد مستقلة عن الزمن. لكن فى حالة تطبيقها تصطدم بالتأكيد بالزمن، بطريقة تشبه طرح سؤال حول معرفة ما إذا كان العالم يجب النظر إليه، بالأحرى على أنه منظومة أو بالأحرى على أنه تاريخ متصل من الاستقرار. هل الفيزياء نزعة لوصف غير المتحرك أو يجب عليها أن تكون تقنينًا للتحولات؟

---

(٦٠) إيلى Eleate: متعلق بمدرسة إيليه الفلسفية. (المترجم)

هل الزمن موجود؟

طرح أرسطو السؤال حول وجود الزمن بطريقة تم الاعتراض عليها بكثرة: بما أن الماضى لم يعد موجودًا، وحيث إن المستقبل لم يأت بعد، وحيث إن الحاضر نفسه سبق أن انتهى وجوده منذ بدأ في الوجود، كيف يمكن فى هذه الحالة القول بـ "وجود" للزمن؟ يحاول الزمن عبثًا الاحتواء على كل ما هو موجود، ألا يمكننا تصوره على خلاف ذلك كما لو أنه حد يتوارى دائمًا بين عدمين، الماضى من جانب والمستقبل من جانب آخر؟ ولكن وجودًا فى حالة كف عن الوجود، وهو موجود أيضاً؟

ومن ثم لو أمكننا إذن أن نضع وجود الزمن نفسه موضع التساؤل، فإننا نجد فى المقابل أنه من الصعب جدًا أن نثبت وجود العالم بدون الاستعانة بالزمن، ومن الصعب تمامًا أيضًا إنكار الدلائل التى لا تمحى على أنه متأصل فى الأشياء وفى أجسادنا نفسها. الزمن يعرض نفسه علينا بطريقة مبهمة: فمن ناحية هو الذى يجعل الأشياء تستمر فى الوجود (لذلك يمكن القول، بشكل أكثر طرافة، بأنه الوسيلة الأكثر سهولة التى عثرت عليها الطبيعة حتى لا يحدث كل شىء دفعة واحدة)، ومن جانب آخر فهو الذى يجعل الأشياء تتغير. والحاضر، الذى يعتبر فى آخر الأمر الشىء الوحيد الذى يجعلنا موجودين، يحتوى فى الواقع على مفارقة كونه فى الوقت نفسه موجودًا باستمرار ولا يكون هو نفسه أبدًا، بطريقة تُوجب علينا القول بأنه يجمع بين الديمومة والتغير.

والمشكلة التى تُثار بالتساؤل حول الزمن تتضمن أننا لا يمكننا أن ننسحب منه. وكما هى العادة، حينما نرغب فى دراسة شىء ما نبدأ بملاحظته من زوايا مختلفة، لكن عندما يكون الأمر متعلقًا بالزمن، لا يمكن النظر إليه عن بعد حيث إنه يؤثر فينا دون انقطاع. نحن فى الزمن ولا يمكننا الخروج منه. من جانب آخر هناك خاصية يشترك فيها الزمان مع المكان، حيث لا نستطيع أيضًا أن نخرج من المكان. لكن هناك اختلافًا جوهريا بين الزمان والمكان: يمكننا أن ننتقل داخل

المكان، نذهب ونعود فى أى اتجاه، بينما لا يمكننا تغيير مكاننا فى الــزمن. لــذلك فالمكان هو موضع حريتنا، والزمان علامة سجننا.

سوف أتوقف هنا عن استطراداتى الفلسفية القصيرة، نظرًا لقلة الوقت أولاً، وأيضاً بسبب أن علماء تاريخ العلوم يتفقون على القول بأن الفيزيــاء المعاصــرة بدأت مع جاليليو، الذى انتبه تمامًا إلى عدم الضلال فى المناقشات عديمة الجــدوى بشأن طبيعة أو حقيقة الزمن. ولم يهتم سوى بالوضع الذى يجعله ينكب على مجال الفيزياء. وقاده ذلك إلى اعتبار الزمن مقدارًا يمكن أن تكون له كمية وقابلاً لتنظــيم التجارب والربط بينها رياضيًا. وبهذه الطريقة فى التفكير درس ســقوط الأجـسام. وتأكد من أنه إذا كان الزمن، بالأحرى مثل المكان الذى يمكن اجتيــازه، قــد تــم اختياره كبارامتر أساسى، عندئذ يطيع سقوط الأجــسام قانونًــا بــسيطًا: الــسرعة المكتسبة تتناسب ببساطة مع مدة السقوط. وكان هذا الاكتشاف يــشير إلــى مولــد الديناميكا الحديثة، التى أعطت للزمن نظامًا جديدًا. وحتى ذلك الحين كانت الفكــرة التى تكونت عن الزمن مازالت تركز على الهموم البشرية. كان الزمن يخدم البشر بشكل أساسى كوسيلة توجيه فى الوسط الاجتمــاعى وأســلوب تنظــيم وجــودهم المشترك، لكنه لم يدخل بطريقة واضحة وكمية فى دراسة الظواهر الطبيعية.

الزمن الفيزيائى والزمن النفسى

حيث إن الفيزياء محدودة فى طموحاتها فإنها لا تزعم بأنها تجيب عــن كــل الأسئلة التى تتعلق بالزمن. ولقد أخفقت، مثلاً، فــى تحليــل العلاقــة بــين الــزمن الفيزيائى والزمن النفسى، بين زمن الساعات وزمن الوعى. وبين هــذين الــزمنين روابط دون شك، لكن بعض خصائصهما متميزة، وحتــى متعاكــسة. وحتــى الآن تختلف بنية كل منهما عن الأخرى. ويتم تصور الزمن الفيزيائى دائمًا على أنه خيط نحيل ينقضى بشكل متطابق معه هو نفسه. لكن الزمن الشخصى، فــى حــد ذاتــه، ينبسط فى خط منكسر، يمزج إيقاعات مختلفة، وانقطاعات، حتى إنه يشبه بــالأحرى

حبلاً مجدولاً. ويعانى وعينا فى الواقع من عدة حالات زمنية متشابكة، سيان لطبيعتها (زمن أحاسيسنا، وزمن أفكارنا، وزمن أمزجتنا...) أو لمستوياتها، تمامًا مثل حبل مصنوع من عدة خيوط، وهى نفسها تتكون من ألياف رقيقة قصيرة.

ويتمايز الزمن الفيزيائى والزمن النفسى أيضًا بحقيقة أن الأول، وهو دائمًا مركَّز بدقة فى الحاضر، يفصل بين لانهائية الماضى ولانهائية المستقبل بينما الثانى يمزج فى قلب الحاضر قليلاً من الماضى الحديث وقليلاً من المستقبل القريب. وفى الزمن الفيزيائى لا توجد أبدًا لحظات متتابعة معا، حسب تعريفه. أما عن الزمن النفسى فإنه يهيئ نوعًا من التعايش فى قلب الحاضر، للماضى الحديث والمستقبل وشيك الوقوع.(٦١) إنه يوحد بذلك ما لا يتوقف الزمن الفيزيائى عن فصله، ويستبقى ما استولى عليه، ويحتوى ما استبعده، ويحافظ على ما يلغيه. وهكذا عندما نستمع إلى لحن، فإن النغمة السابقة تظل "محفوظة" مع النغمة الراهنة مع الإسقاط النفسى للنغمة المقبلة لتكوين مجموعة متناغمة. ومن ثم يتعايش الماضى الحديث والمستقبل وشيك الحدوث فى الحاضر. وبدون هذه المصاهرة فى قلب الوعى، تكون كل نغمة معزولة عن الأخرى ولن يكون هناك أى لحن بالمعنى الصحيح للكلمة.

ويتمايز الزمن الفيزيائى والزمن النفسى أيضًا بانسيابهما، فالأول ينقضى بشكل منتظم (على الأقل حسب المفهوم التقليدى) بينما الثانى له سيولة متغيرة إلى حد أن فكرة المدة المحسوسة ليس لها سوى تماسك نسبى جدًا: لا يوجد شخصان يحصيان، فى وقت معطى، عددًا متساويا من اللحظات. وتتغير تقديراتنا للمدة مع التقدم فى العمر، وخاصة مع شدة ومعنى الأحداث التى تقع "بالنسبة إلينا".(٦٢) وليس هناك مثل ذلك بالنسبة للزمن الفيزيائى، وهذا هو السبب أننا نحمل ساعات.

---

(٦١)يوضح الاختصاصيون فى علوم الأعصاب أن الوعى يقوم بوظيفته بتتابع ثلاث لحظات، تظل خلالها مجموعة من المعطيات حاضرة معًا فى الذهن.

(٦٢)"كلما زاد خلو الزمان زادت قيمته لدينا"، هذا ما لاحظه فلاديمير جانكيليفيتش Vladimir Jankelevitch. وهذا إثبات كاف لتمييز زمن الأهداف العادية للميكانيكا.

وأخيرًا لا يتفق الزمنان الفيزيائى والنفسى على نظامين متشابهين لمفهـومى الماضى والمستقبل. إنها مشكلة سهم الزمن، التى سوف نعود إليها فيما يلى. ومـا أود قوله بالدرجة الأولى، إن عدم قابلية الزمنين الفيزيائى والنفـسى للاختـزال لا يمكن التغلب عليها على ما يبدو، على الأقل حاليًا. ويُظـن أيـضًا أن علاقاتهمـا موجودة فى نسيج المادة والحياة، لكن محاولات تحويل زمن "العـالم" إلـى زمـن "للنفس" أو العكس أمران لا يمكن فى الحقيقة الوصول إليهما. ولا يبدو أن الـزمن الرياضى لعالِم الفيزياء يستنفد معنى الزمن النفسى، ولا يعطى الزمن المعاش أيضًا حدسًا بكل أوجه الزمن الفيزيائى.

ومن فرط التعميم ربما تكون الفيزياء قد تركت بعض الخـواص الأساسـية للزمن تفلت. والزمن الرتيب لعلماء الفيزياء، يتكون من تكتكات متكررة ومنفـردة، قد لا يكون سوى وصف مثالى فقير جدًا لزمن الحياة.

هل يمكن لمرور الزمن أن يكون متقطعًا؟

اعتبرت الفيزياء، طوال تاريخها، أن المكان متصل، أى من الممكن تصور أجزاء ذات أطوال قصيرة بالدرجة المطلوبة، بدون الوصول إلى حد أبدًا. والنقطة التى تناظر عددًا لانهائيًا من التقسيم، تظل دائمًا بعيدة عن الوصول إليها، لكن مـن الممكن من ناحية المبدأ الاقتراب منها باستمرار. وينتج عن حقيقة أنه من الممكـن كذلك تقدير أطوال صغيرة جدًا، وكذلك منعدمة، عقبات ضخمة، مثال لذلك عنـدما نهتم بالمجال الكهربائى الناتج عن شحنة كهربائية، ولتكن إلكترون، على مسافة "ف r" من هذه الشحنة. يصبح هذا المجال، الذى يتغير تبعًا لـ ١/ف^{٢}، لانهائى عنـدما تصبح المسافة "ف" منعدمة. وتؤدى مثل هذه التباينات أو المتفـردة إلـى عقبـات رياضية يحاول علماء الفيزياء تجنبها بطرائق مختلفة: سيان بتحديد نطاق صلاحية محدود للتعبيرات المتباينة (سنفترض للمثال المذكور لاحقًا أنه إذا أصبحت المسافة "ف" بالغة الصغر، فإن التعبير ب ١/ف^{٢} يجب أن يُـستبدل بتعبيـر آخـر، غيـر

متباين)، أو باستخدام مناهج رياضية تلغى "بشكل اصطناعى" هذه التباينات وتسمح بإجراء الحساب. ويمكن مثلاً الإشارة إلى نظرية التوزيعات، حيث تشبه الأقسام الرياضية دوال غير متصلة قد تأخذ قيمة منعدمة فى كل نقاط المكان، سوى فى عدد محدود من النقاط. ويمكن أيضًا الاستعانة بالعملية التى يطلق عليها إعادة العلاقات إلى حالتها الطبيعية renormalisation. وتحتوى هذه العملية على استبعاد كل الكميات اللانهائية التى تظهر فى الحسابات بأن نحذف منها عددًا قليلاً من الكميات هى فى ذاتها لانهائية، من أجل الحصول على نتيجة محدودة.

وتتضمن الخطوة الأخيرة، الأكثر جرأة، تصور أن المكان نفسه قد يكون منفصلاً discret، أى مبنيا على أساس شبكة، تكون فيه العقد محدودة وغير منعدمة، قد تمثل أدنى مسافة يصبح من المستحيل الهبوط إلى ما دونها. وهكذا يمكن تجنب كل التباينات. لكن هنا أيضًا تظهر مشاكل هائلة. أولاً ماذا يمكن أن يكون عليه مقياس العقدة ومن أين يمكن أن تأتى؟ ثم إن مثل هذه الشبكة قد تقدم اتجاهات متميزة قد تلغى تَوحُّد خواص المكان، أى عدم تغيره مع الدوران. غير أن لحالة عدم التغير هذه، مع التماثلات الأخرى من النوع نفسه، دورًا أساسيًا فى كل الفيزياء خضوعًا لقوانين الحفظ[٦٣] الإجبارية تمامًا.

وقد تستطيع أعمال رياضية حديثة، لاسيما تلك التى أنجزها ألين كونيه Alain Connes فى الثمانينيات، أن تغير مع ذلك توزيع الأدوار. وهى تتعلق بما يطلق عليه الهندسة غير التبادلية non commutative. وهذه الهندسة تتيح تقدير أنواع من البنية المكانية التى تقدم خاصية غير متصلة لكنها لا تكسر التماثلات الأساسية. ويتم التوصل إلى هذه الهندسة الجديدة باستبدال الإحداثيات المكانية العادية، ذات العدد المألوف، برموز جبرية. وتأتى تسمية هذه النظرية من أن هذه الرموز لا تُستبدل فيما بينها (نظام تطبيقها غير تمييزى)، لكنها تبرز بالعكس بعض علاقات التبديل التى تحدد خواص المكان على المستوى الصغير. ولأن

(٦٣)قوانين الحفظ les lois de conservation: مثل حفظ المادة وحفظ الطاقة. (المترجم)

الخواص المألوفة للمكان تعود إلى مستويات الفيزياء المألوفة، فإن تـأثيرات هـذه الهندسة لا تظهر إلا فيما دون مستوى معين. وهذا المستوى، الذى قد يكـون مـا يطلق عليه مقياس بلانك (١٠ -٣٥ متر)، قد يمثل حدًا على قابلية المكان للتقسيم.

ولكن فلنعد فى هذا الأمر مع الزمن. يفترض علماء الفيزياء أنه يتكون مـن لحظات تتابع فى بنية متصلة. وتلعب هذه اللحظات بالنسبة للزمن نفس دور النقطة بالنسبة للمكان.

فكلها أيضًا حيث يتعذر إدراكها. وبالفعل لا نشعر باللحظات التى مـضت. وبالنسبة إلينا كذلك كما سبق أن قلنا، فإن الحاضر نوع من المائع المتصل يمتـزج قليلاً بالماضى الحديث والمستقبل وشيك الحدوث، بدون أن يتأتى لأى من أحاسيسنا أن تبين الخيمياء l`lchimie التى ينجح من خلالها تتالى لحظات فى التكثف علـى هيئة وقت. ويتم أحيانًا ذكر فكرة زمن غير متصل، أى عدد ذرى للوقت، لكن لـم تكن هناك أبدًا أية نظرية تلقى عليه ضوءًا، على الأقل فى حدود معرفتى. ويجـب القول أن هذه الفكرة تضع عوائق ضخمة فى مجال المفاهيم: كيف يمكن للزمن أن يتكون من لحظات يفصل ما بينها فترات خاصة من الزمن؟ ولا تكـون اسـتحالة ملاحظة اللحظات متناقضة فى كل الحالات مع فكرة الزمن المتصل، بنفس معنـى أن غياب جسم شبيه بنقطة بشكل واقعى لا يتناقض مع إمكانية وجود مكان متصل.

سببية الرحلات فى الزمن وموانعها

تدفع حركات عقارب ساعاتنا إلى تشبيه الزمن بفيض مؤلف مـن لحظـات متقاربة للغاية تنقضى الواحدة تلو الأخرى، أى بمتغير فى اتجاه وحيد. ويمنح هـذا التمثيل للزمن طوبولوجيا أكثر فقرًا من طوبولوجيا المكان، الذى له، فى حد ذاتـه، ثلاثة أبعاد. وهذا التمثيل لا يتيح فى الحقيقة سوى متغيرين، الخط أو الدائرة، تبعًـا لما إذا كان منحنى الزمن مفتوحًا أو مغلقًا. ومن ثم لا يوجد بشكل مسبق a priori سوى نوعين ممكنين للزمن، الزمن الخطى والزمن الدائرى. ويظهر مجرى الزمن

فى تلك الانحناءات بحكم أنها ذات اتجاهات، أى أنها تمضي فى اتجاهات محـــددة تمامًا، من الماضى إلى المستقبل.

وإذا كان علماء الفيزياء قد اختاروا تبنى زمن خطى وبالأحرى دائرى، فإن ذلك حدث بمقتضى قاعدة السببية والتى تبعًا لها يكون سبب أى ظـــاهرة موجـــودًا بالضرورة داخل الظاهرة نفسها. وتمنع قاعدة السببية هذه من جانب آخر السفر فى الزمن، لأن هذه الرحلات قد تسمح من حيث المبدأ بالرجوع فى الماضـــى لتغييـــر تتالى أحداث سبق لها أن وقعت. وقد تؤدى هذه الإمكانية إلـــى مواجهـــة مواقـــف قاسية: قد يقابل شاب جدته فى الماضى حينما كانت لا تزال شابة، ويقدم لها القليل من الغزل على مقود سيارة رياضية أنيقة، وإذ يخيب سعيه عند المنعطف يرســـل المرأة الشابة إلى العالم الآخر، ومن ثم يمنعها من أن تأتى إلى العالم بأول حلقة فى سلسلة النسب الذى يعتبر الشاب المذكور مع ذلك جزءًا منه.. ومثل هذا التنـــاقض، ممكن مع زمن دائرى لأن ما نسميه السبب يمكنه أيضا أن يصبح الحدث والعكـــس بالعكس، وهو ما لا يحدث مع الزمن الخطى، ذلك الذى ينظم الأحداث تبعًا لترتيب متسلسل زمنيا لا يمكن تلافيه. ولا يستطيع المرء أن يذهب فى اللحظة نفسها إلـــى الماضى والمستقبل. ومثل ذلك النهر الذى ينساب دائمًا فى الاتجاه نفسه، من أعلى النهر إلى مهبطه، فإن الزمن له مجرى محدد تمامًا، ينساب مـــن الماضـــى إلـــى المستقبل، بدون أن يعكس طريقه وبدون أن ينعطف أبدًا، حتـــى إن لحظـــة مـــا لا يمكنها أبدًا أن تتكرر...

وتتداعى قاعدة السببية بطرائق مختلفة تبعًا للنظريات الفيزيائيـــة. ولا يـــتم إرجاعها دائمًا بوضوح إلى فكرة السبب، ويُكتفى أحيانًا بفرض علم أحداث تاريخية إجبارى بين بعض أنواع الحوادث. ولنتذكر بسرعة، بالرسوم التوضيحية، الطريقـــة التى تعالَج بها هذه القاعدة فى النسبية (الخاصة أو العامة) وفى الفيزياء الكمية.

فى النسبية الخاصة

قاعدة السببية مكفولة باستحالة نقل الطاقة أو المعلومات بسرعة أعلى من سرعة الضوء. وتمنع هذه الاستحالة الرحلات فى الزمن وانعكاس التسلسل الزمنى.

فى النسبية العامة

تُنتهك السببية إذا كانت هناك حلقة زمنية، أى خط كون ligne d`univers منغلق على نفسه. وتتنبأ النظرية بأن مثل هذه الحلقات قد تظهر خلف أفق الثقوب السوداء فى حالة الدوران بسرعة كبيرة، لكن ليس هناك ما يضمن وجود هذه الحلقات.

فى الفيزياء الكمية غير النسبية

السببية مسجلة فى معادلة شرودنجر Schrodinger والتى تلعب بالنسبة للهاملتونية[٦٤] دور مولِّد متناهى الصغر للانتقالات فى الزمن. ويتعلق الأمر بسببية بدون سبب واضح.

فى النظرية الكمية للمجالات

يتم التعبير عن متطلبات السببية باستخدام قواعد استبدالات رموز المجالات. فرمز إيجاد Φ^* (x) لجسيم عند النقطة x ورمز إلغاء الجسيم $\Phi(y)$ نفسه عند النقطة y يجب استبدالهما من أجل فصل نوع مكان genre espace ولا يتم استبدالهما لفصل نوع زمان genre temps. وتمنع هذه القواعد أى جسيم من التحرك على خط كون من نوع مكان (يتحرك الجسيم أسرع من الضوء) وتفرض، للحركة على خط نوع زمان، أن يسبق إيجاد الجسيم إلغاؤه. ولا يمكن لهذه

(٦٤) الهاملتونية hamiltonien: مجموع الطاقتين الكامنة والحركية فى المنظومة (فى الميكانيكا النيوتونية). (المترجم)

المتطلبات أن تكون كافية إلا إذا كان التحلل إلى موجات مسطحة لرموز مجـالات تحتوى على ترددات سالبة، مناظرة لجسيمات مضادة. ومـن ثـم تكـون المـادة المضادة أثرًا "ماديا" بما أن الزمن يمر فى اتجاه وحيد.

وبشكل عام، يتم التعبير عن قاعدة السببية بطريقة غير مباشرة يطلق عليهـا الثابتية l'invariance CPT، التى نتمهل عندها فيما يلى.

الثابتية CPT

هناك بعض التماثلات الهندسية المألوفة لنا. والتماثلات الأخـرى، الأكثـر تجريدًا، يستعين بها علماء الفيزياء عادة. وهذه حالة "التعادل parite"، بين "توحيـد conjugaison الشحنة"، و"انعكاس renversement الزمن".

والتعادل عملية يشار إليها بالرمز p (من parite)، وتتضمن رؤية صـورة تجربة معطاة فى مرآة. ولنأخذ مثلاً لتجربة حقيقية يـستخدم فيهـا تـصادم بـين جسيمات. ويتضمن تطبيق العملية P فى مثل هذا الموقف إجـراء هـذه التجربـة بتصور أنه تمت رؤيتها فى مرآة. تظل طبيعة الجسيمات المستخدمة هى نفـسها. وفى المقابل تتغير أوضاعها حيث ينعكس اليمين واليسار فى العملية.

والسؤال الذى يُطرح طبعًا يدور حول معرفة ما إذا، فى حالة تحقـق هـذه العملية، كانت التجربة الجديدة يمكن أو لا يمكن تحققها فى الطبيعة أو فى المختبر. إذا كانت الإجابة بنعم، سنقول إن التجربة تخضع للتماثل p. وفى الحالة العكـسية، نقول إنها خالفت التماثل.

ومن جهة أخرى كل جسيم يكون مصحوبًا بجسيم مضاد، له نفـس كتلتـه وحيث تكون كل شحناته، خاصة الشحنة الكهربائية، مـضادة لـشحنات الجـسيم المناظر. وتوحيد الشحنة هو بالضبط عملية تتضمن (نظريًا) تحـول جـسيم إلـى الجسيم المضاد، والعكس بالعكس. مثال لذلك يحوّل توحيد الشحنة الإلكترون إلـى بوزيترون positron والبوزيترون إلى إلكترون، والبروتون إلى بروتـون مـضاد

والبروتون المضاد إلى بروتون. ويُشار إلى هذه العملية ب C، للدلالة على الشحنة charge، نظرًا لتقلب الشحنات بين الجسيمات والجسيمات المضادة.

لنبدأ من جديد تجربة فعلية يحدث خلالها تصادم بين جسيمات. ولنسجل بعناية سرعات ومواقع كلٍ من الجسيمات التى تدخل طوال التجربة. ثم نطبق عندئذ العملية C: فى كل مرة نقابل فيها جسيمًا، نستبدله بجسيمه المضاد ثم نفرض عليه أن يتبع بالضبط المسار نفسه الذى كان عليه الجسيم فى موضعه الأول. فإذا نظرنا مثلاً لتصادم بين بروتون ونوترون، ستصف لنا العملية C التصادم "نفسه"، باستثناء أنه سيحدث بين بروتون مضاد ونوترون مضاد. ولو حدث مرة أن اكتملت هذه العملية فإن التجربة الجديدة قد تتحقق، وسنقول إن التجربة تتفق مع التماثل C. وفى الحالة العكسية سنقول إنها لا تتفق معها.

وفى النهاية تتطابق تجربة "انعكاس الزمن"، المشار إليها بالرمز T، مع انعكاس حركة وبالأحرى مع انعكاس زمن بالمعنى الدقيق للكلمة، وتتضمن مد ظاهرة فى الاتجاه العكسى للاتجاه الذى نتجت فيه، وبقول آخر إخراج الفيلم بالعكس. وتبعًا للقوانين الكلاسيكية إذا حدث فى لحظة معطاة t_0 مأخوذة كأصل للأزمنة ($t_0 = 0$)، فإن سرعات كل جرم فى المجموعة الشمسية (الشمس، والكواكب وأقمارها) كانت منعكسة، قد لا يتغير مدارها، لكن موضع كل جرم على المدار فى لحظة تالية t سيكون ذلك الذى كان يحتله عند اللحظة t _.

ويلعب التعادل وتوحيد الشحنة وانعكاس الزمن دورًا أساسيًا فى معادلات لعلم فيزياء الجسيمات، بانحراف الثابتية CPT: وكما يشير مختصر حروفها، فهى ثلاث عمليات C وP وT. وعندما لا تغير هذه العملية أيًا من القوانين المعروفة فى الفيزياء، فالمقصود هو الثابتية CPT. وبشكل تصورى تُفسر الثابتية CPT بأن قوانين فيزياء عالمنا تتماثل مع قوانين عالم مادة مضادة يُرصد فى مرآة حيث الزمن ينساب فى الاتجاه العكسى. وفيما يرتبط بشكل جوهرى بقاعدة السببية، التى تنظم الأحداث تبعًا لتسلسل لا يمكن تلافيه، يتبع هذه الثابتية خاصة تماثل بين المادة

والمادة المضادة. وهي تتنبأ، خاصة، بأن الكتلة - دوام الجسيمات - تتساوى بدقة مع نظيريها في جسيماتها المضادة.

التفاعل الضعيف والكايونات المتعادلة

منذ وقت بعيد كان علماء الفيزياء، مستندين إلى الحس السليم، يعتقدون أن كل قوانين الفيزياء تحافظ على التماثل P. أليس من الواضح، عندما نرى ترتيب أشياء في المرآة، أننا قد نحقق هذا الترتيب في الواقع أيضاً؟ ومع ذلك كان من الضروري الإشارة في ١٩٥٧، وهو ما أثار دهشة عامة، إلى أن التفاعل النووي الضعيف، المسئول بشكل خاص عن النشاط الإشعاعي β والذي بواسطته يتفتت النوترون إلى بروتون وإلكترون، لا يحافظ على التماثل P. وبقول آخر، فإن الصورة في مرآة للظاهرة التي يحكمها التفاعل الضعيف تناظر ظاهرة لا توجد في الطبيعة وأنه لا يمكننا كذلك إنتاجها في المختبر. ويتيح لنا هذا الخرق للتعادل، الخاص بالتفاعل الضعيف، أن نحدد بشكل مطلق اليمين واليسار.

وسوف نبيّن في الوقت نفسه أن التفاعل الضعيف كان يخرق أيضًا الثابتية بتوحيد الشحنة، بطريقة جعلت التماثل العام PC، نفسه، محفوظًا. وتتضمن تلك الثابتية بواسطة CP، بالاشتراك مع ثابتية CPT، الثابتية بواسطة T. ولم يتم الحصول على هذه النتيجة المطمئنة إلا بعد بضعة سنوات. وفي ١٩٦٤ كشفت تجربة عن أن الثابتية بواسطة PC منتهكة هي نفسها أيضًا، حتى لو لم يكن ذلك سوى بدرجة بالغة الخفة، عند تفتت (بواسطة التفاعل الضعيف) جسيمات غير مألوفة يُطلق عليها "الكايونات[٦٥] المتعادلة". وهذه الجسيمات هي الوحيدة التي حدث بسببها أن هذا اللاتماثل لم يُرصد أبدًا. ولكن في هذه الحالة، كانت CPT محفوظة دائمًا، وإذا لم تكن PC متزامنة معها، فإن T لا

(٦٥)كايون Kaon أو KA: جسيم أولي K متعادل أو ذو شحنة موجبة أو سالبة كتلته تساوي ٩٦٥ مرة كتلة الإلكترون. (المترجم)

تتزامن معها أيضًا، لكن هذا الخرق لم يظهر بطريقة مباشرة.

وقدمت تجربة فى المختبر الأوروبى لفيزياء الجسيمات CERN، أطلق عليها CPLEAR، فى ١٩٩٨ مساهمة حاسمة فى هذا الجدل. لقد أتاحت، بطريقة مباشرة، توضيح خرق تماثل زمنى فى قلب منظومة مجهرية خاصة، تتكون من كايون متعادل وجسيمه المضاد. ولقد ثبت منذ زمن طويل أن الكايون المتعادل يتحول عبر الزمن إلى جسيمه المضاد الخاص، والذى يتحول بدوره من جديد إلى كايون متعادل. وما أظهرته تجربة CPLEAR، هو أن سرعة تحول كايون متعادل إلى جسيمه المضاد ليست بالضبط هى نفس سرعة العملية العكسية، وهو عكس ما يتنبأ به التماثل T. وهذه هى المرة الأولى التى تم خلالها القياس المباشر للاختلاف بين عملية مجهرية والعملية العكسية. والأصل العميق لهذا الكسر البسيط للتماثل الزمنى الماضى – المستقبل مازال غامضًا.

مشكلة سهم الزمن

بالنسبة إلينا لا يكون الماضى والمستقبل متكافئين. فنحن نتذكر، مثلاً، جزءًا من الماضى، ولكن هذا لا يحدث أبدًا بالنسبة للمستقبل. واللاتماثل هذا بين الماضى والمستقبل هو إظهار لمرور الزمن نفسه. ومنذ نيوتن وعلماء الفيزياء يتساءلون ما إذا كان هذا التمايز موجودًا أيضًا على مستوى الظواهر الفيزيائية. وهل هى التى تنتج أيضًا تمييزًا بين الماضى والمستقبل؟

فلنفكر فى مائدة بلياردو وضعنا عليها كرتين فى حالة تصادم. بعد الصدمة تتباعد الكرتان فى اتجاهين متضادين. ولو أهملنا الاحتكاكات تظل سرعتاهما ثابتة. لو أننا كنا نصور فيلمًا عن هذا التصادم وعرضنا الفيلم بطريقة عكسية. يعادل ذلك تغيير قواعد الماضى والمستقبل، أى عكس مجرى الزمن. وما نراه حينئذ على الشاشة هو تصادم آخر بين كرتين، يناظر التصادم الذى حدث فى الواقع ولكن مع انعكاس كلتا السرعتين.

والمهم فى هذا الموضوع أن المشاهد الذى لن يرى إلا عرض الفيلم المعكوس سيعجز تمامًا عن التكهن بما إذا كان ما يراه يطابق ما حدث فى الواقع أم أن الفيلم عُرض معكوسًا بالفعل. وسبب الالتباس أن التصادم الثانى حدث بنفس قوانين ديناميكا التصادم الأول. ومن ثم فإن التصادم الثانى "فيزيائى" تمامًا أيضًا، بمعنى أنه أيضًا قابل للتحقيق تمامًا مثل مرور الزمن، ولا يوجد أى تمايز بين الماضى والمستقبل. وهذا يعنى، ليس أنه يجيز الرحلات فى الزمن، ولكن أنه بالنسبة إليه يكون مجرى الزمن اصطلاحيا.

وتبعًا للفيزياء الراهنة فإن كل الظواهر التى تحدث على المستوى المجهرى تكون مثل تلك التصادمات بين كرات البليار، أى قابلة للانعكاس. غير أنه على مستوانا، لا نلاحظ سوى ظواهر غير قابلة للانعكاس، ابتداء بحقيقة أن العمر يتقدم بنا: وإذا صورنا مشهدًا فى فيلم عن الحياة اليومية وعرضنا الفيلم فى الاتجاه العكسى، فسوف نعرف منذ اللقطات الأولى أنه حدثت عملية عكس للعرض (حيث الغواص بعيد عن حوض السباحة وجاف تمامًا فوق شرفة الغطس). وعلى المستوى العيانى لن يكون الزمن فى هذه الحالة إلا الماضى: فهو يبتكر ويبدع ويستهلك ويهدم، لكنه لا يستطيع أبدًا أن يرمم ما خرَّبه.

كيف يمكن تفسير ظهور عدم القابلية للانعكاس هذا الذى يُلاحظ على المستوى العيانى انطلاقًا من قوانين الفيزياء التى لا تعرفه على المستوى المجهرى؟ هذه المشكلة، التى يطلق عليها "سهم الزمن Fleche du temps" كانت موضع نقاش حاد منذ قرنين. وكان التفسير الأقدم يعتمد على اللاانعكاسية المرتبطة بالقانون الثانى للديناميكا الحرارية، القائل بأن إنتروبيا l`entropie منظومة معزولة ليس أمامها سوى الزيادة مع مرور الزمن: مثل أن الماء الفاتر لا يصبح أبدًا من جديد تجمعًا من ماء حار وماء بارد، فالمنظومة المرئية التى تغيرت لا يمكن أن تعود إلى هيئتها الأولية. وفى زمن أحدث اقترح علماء الفيزياء أن سهم الزمن قد يكون ناشئًا بالأحرى عن تمدد الكون نفسه، الذى وجَّه كل العمليات الفيزيائية تبعًا

لمسار غير قابل للانعكاس. وتم أيضًا اقتراح طرائق أخرى تجعل مرجعها الفيزياء الكمية أو فيزياء الجسيمات. غير أنه لا يمكن اعتبار أىٍّ من هذه التفسيرات تفسيرًا شاملاً أو حاسمًا. لذلك يبدو أنه لن تكون هناك وحدة نظرية حول مفهوم الزمن، كأن هناك طريقتين فى التفكير لا تتوقفان عن مواجهة كل منهما الأخرى، تلك القائمة على التاريخ والزمن، وتلك التى تستند على الثابتية وغياب الزمن. وربما تناظران مكونين متناقضين لكنهما لا ينفصلان ضمن سعينا لفهم العالم: لا يمكننا أن نفكر فى العالم بدون الزمن ولا يمكننا وصفه بدون أن نتخيل أنه يكوّن بعض الثابتية.

الباب الثالث

المجموعة الشمسية

هل نحن أبناء الشمس ؟
تاريخ أصولنا[1]

بقلم: أندريه براهيك
Andre BRAHIC

ترجمة: عزت عامر

من أين أتينا؟ من نحن؟ إلى أين نحن ذاهبون؟ هل نحن وحدنا؟ بكلمات أخرى: ما موقع الإنسان فى الكون؟ لأول مرة بعد آلاف من التساؤلات توصل العلماء إلى إجماع محدد حول المراحل الرئيسية لنشوء المجموعة الشمسية بفضل تطورات هائلة لعلم الفلك خلال العقود الماضية. وقلما يكون سهلاً تصور عمر الكون الذى يقدره علماء الفلك بنحو ١٥ مليار سنة. وعندما نتصور أننا فى نهاية سنة متخيلة كانت قد بدأت فى الأول من يناير مع بداية تمدد الكون، فإن أول كائنات تشبه الإنسان hominides ظهرت فى ٣١ ديسمبر الساعة ٢٢ و٣٠ دقيقة وظهر عصر النهضة فى أوروبا فى الثانية السابقة على أول دقة لمنتصف الليل. ومع ذلك كانت هذه الثانية كافية لكى يلاحظ الإنسان العالم ويعبر عن افتراضات عقلية وعلمية قائمة على أصل الأرض والكواكب. وليس لدينا هنا بالطبع طموح لأن نسجل كل المغامرة الفكرية والبشرية التى سبقت. وسيرضينا أن نسترجع كيف استطعنا الآن، بتطورات الفكر المنطقى فى العصر الذهبى لعلم الفلك، أن نصف نشوء الأرض والكواكب. ومثل المتحرى الذى يجمع وينظم الأدلة للعثور على المذنب، يبحث علماء الفلك عن آثار وبينات عن هذا العصر القديم. ويتصرفون مثل علماء الآثار القديمة الذين يعيدون، انطلاقاً من شظايا الفخاريات وقواعد أساس المبانى القديمة، صياغة تاريخ الحضارات الماضية.

---

(١) نص المحاضرة رقم ١٨٩ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٧ يوليو ٢٠٠٠.

هل نحن أبناء الشمس؟ لا فنجم الشمس هو شقيقنا الأكبر. نحن بالأحرى أبناء النجوم والزمن. وباستثناء الهيدروجين والهليوم الموجودين في أجسامنا واللذين يعودان إلى بداية الكون، فإن الذرات التى تتكون منها أجسامنا تم إنتاجها بواسطة أجيال كثيرة من النجوم خلال ١٠ مليارات السنوات التى سبقت مولد الشمس. ولزم بعد ذلك نحو ٥ مليارات سنة لكى يظهر الإنسان.

العصر الذهبى لعلم الفلك

لم يكن هناك ما هو مستطاع بدون التطور المدهش لعلوم الكون منذ الستينيات، وهذا العصر الذهبى ناجم عن اقتران عدة عوامل ملائمة مثل: انطلاق علم الفلك الفضائى، واستخدام أجهزة الكمبيوتر القديرة، وإنشاء تلسكوبات ضخمة، واستكمال كاشفات جديدة وازدياد عدد الباحثين، ولقد تضاعف عدد علماء الفلك المحترفين ٣٠ مرة على الأقل خلال ٦٠ سنة!

وبواسطة علم الفلك الراديوى، الذى برز مع تجميع رادارات الحرب العالمية الأخيرة، وإطلاق أقمار صناعية، والمراصد الفلكية التى لا تعانى من التشوش الناتج عن الغلاف الجوى الأرضى، لم تستمر عمليات رصد السماء بعد ذلك مقصورة على النطاق البصرى، والآن يمكن رؤية الأجرام السماوية فى كل نطاقات أطوال الموجات، من موجات الراديو إلى جاما مرورًا بالإشعاعات الملليمترية، ما تحت الحمراء، والبصرية، وفوق البنفسجية والأشعة السينية. ويمكننا مقارنة وضعنا بوضع أطفال ولدوا بنظارات "خضراء" لم تكن ترى حينئذ سوى الأشياء الخضراء فى بيئتها. ونحن الآن بالضبط فى لحظة، المراهقة؛ حيث يمكن للمرء أن ينزع عن نفسه بقسوة نظاراته وأن يرى فى النهاية كل الألوان، ويكتشف عندئذ أن العالم أكثر ثراء وتنوعًا بكثير مما كان يتوقع!

ومع استكشاف الكواكب، فى موضعها الأصلى، بواسطة مجسات فضائية تعتبر عيونًا لنا وآذانًا مقذوفة على بعد مليارات الكيلومترات، أصبحنا نعيش

العصر الذهبى لاستكشاف المجموعة الشمسية. ويمكننا مقارنة هذه الآونة بلحظة اكتشاف الأمريكتين والمناطق البعيدة بواسطة البحارة العظام مثل: كريستوفر كولومبس Christophe Colomb ومجلان Magellan والآخرين. وما كان يجب استكشافه منذ خمسة قرون أصبح أحد عناصر حياتنا اليومية. ولم تعد الكواكب وأقمارها بالنسبة إلينا مجرد نقاط بسيطة من الضوء نكتفى بدراسة حركتها. فهى "كرات أرضية" كل على حدة التى تفلت دراستها من علماء الفلك وحدهم، لكى تصبح أيضًا مجالاً لعلماء الجيوفزياء.[٢]

فى حين أنه منذ بداية القرن العشرين قامت اكتشافات النسبية العامة وميكانيكا الكم والرياضيات "الحديثة" ومجالات البحث الأخرى الكثيرة، بتجديد عميق لمعارف منضبطة مثل: الفيزياء أو الكيمياء أو الرياضيات، ولسوف تشهد نهاية القرن تفجرات فى علوم الإنسانيات والكون والبيولوجى وعلم الفلك. وفى عام ١٩٠٠ لم يكن البشر يعرفون سبب لمعان النجوم، وكانوا يجهلون وجود مجرات ولم يكونوا يرون الكواكب إلا كنقاط مضيئة فى السماء. وفى عام ٢٠٠٠ عرف علماء الفلك سبب لمعان النجوم، ورصدوا مليارات من المجرات وقدّروا أسطح الكواكب بدقة تتراوح بين بضع عشرات إلى بضع مئات من الأمتار.

وكان لهذا الانقلاب بالطبع نتائج عميقة على مجتمعنا. وعلى الصعيد الثقافى فإن اكتشاف كون أكثر ثراء بكثير أمر لم نكن نتخيله من قبل والتنوع الهائل للظواهر المرصودة من المتوقع أن يصل بنا إلى تغيير عميق فى رؤيتنا لوضع الإنسان فى الكون. وعلى الصعيد العلمى فإن الكون مختبر خارق مجانى؛ حيث تنتشر ظواهر غير قابلة للنسخ على الأرض. ورصد المادة فى شروط ذات ضغوط ودرجات حرارة وكثافة تصل إلى أقصى الحدود، قد يتيح لنا التقدم فى مجالات شديدة التنوع فى الفيزياء والكيمياء. وعلى الصعيد الصناعى فإن البحث الفضائى هو المجال الذى يشهد تنافسًا شديدًا بين القوى العظمى وهى أوروبا والولايات

---

(٢) علماء الجيوفيزياء geophysiciens: علماء فيزياء الأرض. (المترجم)

المتحدة واليابان، وبشكل أقل روسيا والصين والهند، والهدف بكل بساطة الهيمنة على عالم الاقتصاد.

وهناك دافع مهم لدراسة أصولنا هو أن نعرف أرضنا ذاتها بشكل أفضل. وكثيرًا ما يكون من الصعب بالنسبة إلينا تصورها على أنها كوكب عادى غير أنها، من ناحية موقعها ومقاسها، شائعة حقًا. وهى خاضعة لآليات الفيزياء نفسها مثلها مثل الأجرام الأخرى فى المجموعة الشمسية. ومن أجل معرفة الأرض بشكل أفضل، يجب أن نفعل بكل دقة ما يفعله عالم الفيزياء فى مختبره؛ أى نجرى تجارب. من المستحيل ومما لا يُطمح إليه بشكل خاص إجراء أدنى التجارب على الأرض، مثل تسخينها أو شطرها إلى جزأين، أو هزها، أو تشويهها، إلخ... ولحسن الحظ أن دراسة الكواكب الأخرى تجعل هذه التجارب عديمة الجدوى! وتكفى مقارنة الأرض بجرم أكبر أو أصغر فى الحجم، وأكثر كثافة أو أقل، أكثر سخونة أو أقل، وبالتكوين الكيميائى المختلف ..إلخ؛ لكى نفهم دور كل بارامتر parameter.

ومن أهم التطورات فى المغامرة الفضائية أنها أتاحت للبشر فهم العلاقات الوثيقة بين الكواكب، وقادتهم إلى الشروع فى دراسة مقارنة بين أجرام المجموعة الشمسية. ولدى الكواكب الأخرى والأقمار فى الواقع الكثير لتخبرنا به عن الأرض والعكس بالعكس. فكوكب الزهرة، مثلاً، له كتلة الأرض نفسها وأبعادها نفسها، لكنه يدور بسرعة أقل بكثير ولا يوجد ماء سائل على سطحه: لذلك فإن علم الأرصاد الجوية meteorologie الخاص به أكثر سهولة منه على الأرض. والغلاف الجوى لتيتان،[٣] مثله مثل الغلاف الجوى للأرض، يتكون بشكل رئيسى من ثانى أكسيد الكربون والضغط على التربة هو نفسه فوق الأرض، وفى المقابل فإنه أكثر برودة بكثير. وبراكين المريخ أكثر ضخامة من نظائرها الأرضية

---

(٣) تيتان Titan: أحد توابع كوكب زحل. (المترجم)

وبراكين إيو[٤] أكثر نشاطًا. وهكذا يمكن إعطاء العديد من الأمثلة. وفى حين أنـــه فى القرن التاسع عشر، العصر الذهبى للجيولوجيا، كانت دراسة الأرض محلية من الناحية الأساسية، أصبحت شاملة فى القرن العشرين مـــع ظهــور الجيوفيزيـــاء. ويمكن تصور أنه خلال العقود القادمة، أن يظهـــر مبحـــث جديـــد، هـــو مبحـــث الكواكب[٥] المقارن الذى سيتيح معرفة أفضل بأرضنا. وبعض الظواهر الأرضـــية مثل: الظواهر البركانية أو علم الأرصاد الجوية أو أيضًا النشاط الـــداخلى، يمكـــن فهمها كذلك بشكل أفضل والتنبؤ بها بشكل أفضل.

ومن الواضح الآن أن معرفة جيدة بالأرض تأتى من خلال إدراك لموقعهـــا فى الكون ولتعاقب الأحداث التى أدت إلى تكتل الذرات التى تتكون منهـــا الأرض. وقبل الستينيات لم يكن علماء الجيولوجيا يهتمون بالكواكب الأخرى وكان علمـــاء الفلك يجهلون كوكب الأرض، ونحن ندرك الآن أن الأرض ليست ســـوى عـــضو ضمن آخرين فى العائلة الكبيرة للمجموعة الشمسية. كيف تكوّنت الـــذرات وبأيـــة نسبة؟ وكيف نشأت النجوم وكيف ظهر نجم الشمس؟ وكيـــف احتـــشدت كواكـــب وأقمار حول الشمس؟ ومثل هذه المسائل التى تعتبر شرطًا لمعرفـــة جيـــدة عـــن الأرض وتطورها!

الصواب أو عدم الصواب ؟

لقد أعطت اليونان القديمة التى وهبت لنا الاستدلال العقلى، والعصر الوسيط الذى علّمنا فضيلة الملاحظة وعصر النهضة الذى جمع بين الاثنين، للعلماء أداتـــى منهجهم: الملاحظة التى تزودنا بوقائع لابد أن يخضع لها العالم كله والنظرية التى تسعى جاهدة للربط بين وقائع جُمعت من جهات مختلفة. ويجب أن نفهم جيـــدًا أن

---

(٤) إيو Io: أحد أقمار المشترى الأربعة اللامعة وقد رآه لأول مرة جاليليو. (المترجم)

(٥) مبحث الكواكب planetologie: فرع من علم الفضاء الـــذى يبحـــث أو يتعلـــق بالكواكـــب والأقمـــار الصناعية والظواهر الجوية للنظام الشمسى. (المترجم)

علماء الفلك يمكنهم إثبات أن نظرية ما خاطئة كلما ظهر تناقض مع ما رصد ما، لكنهم لا يستطيعون إثبات أن ما يقولونه صوابًا طالما هناك رصد لا يثبت هذا التفسير. وبقول آخر، نحن نعرف الطريقة التى لم تتشكل بها الأرض. ونظن أننا عرفنا المراحل الرئيسية لسيرة الأرض، لكننا لا نستطيع إثبات أن الحقيقة فى حوزتنا.

والمدخل العقلى للظواهر هو الوحيد الذى يتيح لنا التقدم. وبتعبير آخر، فإن ملاحظة العالم الذى يحيط بنا يجب أن تقودنا ويتم تقييم كل النظريات بطريقة كمية، وتدعم الحسابات الدقيقة كل محاولة تفسير وكل نظرية، وكل منظومة، ومهما كانت جيدة، يجب أن تصمد أمام وقائع الملاحظة، مهما كانت مستهجنة.

وتوضح المجادلات حول مسألة أصولنا توضيحًا جيدًا الجدل الأبدى بين هؤلاء الذين يراهنون على الذكاء ومن يرفضون الشك، ويجب دائمًا أن نحفظ فى الذاكرة المظالم التى وقعت على الذين كانت لديهم شجاعة التمسك بآرائهم، حتى لو ناهضوا السلطة القائمة. ولأنه فضّل كوبرنيكوس Copernic على بطليموس Ptolemee، وأعاد النظر فى فيزياء أرسطو وعالمه المحدود والثابت وفضل عنه كونًا لانهائيًا، انطلق فى تطور شامل وأبدى، ولأنه رفض إنكار أفكاره، هلك جيوردانو برونو Giordano Bruno فى عام ١٦٠٠ على عمود الحطب حيث يُحرق عليه المحكوم عليهم بالإعدام حرقًا. وفى القرن العشرين، وبسبب عدم إخضاعهم، مات علماء فى معسكرات هتلر أو ستالين وسقط الكثيرون أيضًا برصاص المتعصبين دينيًا.

ولكن خيرًا من أن نتمهل أمام الأشواك، فلنفكر فى الورود وفى المغامرة غير المألوفة للمعرفة وهو بحثنا هذا عن ماضينا. وكيف لنا ألا نندهش أمام قوة العقل البشرى الذى وصل إلى فهم ما حدث منذ عدة مليارات من السنوات؛ أى خلال فترة أطول عشرات الملايين من المرات من فترة حياة أى إنسان. ووصل الإنسان الحديث أيضًا إلى رصد ما يبعد مسافات أبعد مئات الملايين من مليارات

المليارات (١٠^٢٦) مرة من قامته هو نفسه! وفى الوقت نفسه، تعطى اكتشافات علماء الفلك لهؤلاء الذين يريدون وضعنا فى مركز الكون درسًا عظيمًا فى التواضع.

سوف يسأل بعضنا "ما جدوى الرجوع فى ماضينا؟". وسيضيف آخرون "الأولى أن نهتم بالحاضر!" وفى الحقيقة فإن هذا البحث هو أفضل وسيلة لأفضل معرفة بالأرض والكواكب، والأفضل لفهمها وفى النهاية الأفضل للمحافظة عليها والأفضل للعيش عليها. ويضع تقدم التقنيات والسباق نحو التطور تحديات ضخمة أمام الإنسان الحديث. فهل سيعرف كيف يسيطر على مخترعاته الجديدة؟ ألا يخاطر بتعريض ظروف الحياة على الأرض للخطر؟ وتكمن الإجابة الوحيدة الممكنة فى معرفة العالم المحيط بنا وآليات تطوره. وتعتبر استعادة السياق الطويل للأحداث التى أفضت إلى العالم الراهن هى الطريقة الأفضل للتنبؤ بتسلسل التاريخ والسيطرة على مستقبلنا.

ويجب أن تشكل الأساليب التى يستخدمها العلماء درسًا عقليًا هائلاً لكل البشر، وهذا الذهاب والإياب المستمر بين النظرية والملاحظة، وبين حرية التفكير الخالصة والإجبار على الأعمال، يعتبر ممارسة ممتازة لتنظيم وجودنا اليومى. ويمكن لكل شخص أن يتعود على الشك فى النتائج الواثقة، وعلى الرضوخ أمام الوقائع، مهما كانت مزعجة، ومهما كانت مثيرة للغيظ، وعلى حب قوة الخيال فى حالة مواجهته للحواجز.

وبدأ الستار فى النهاية ينزاح عن المشكلات التى لم يكن لها حل منذ قرون. ولدينا الآن عناصر إجابة عن الأسئلة التى طرحناها منذ آلاف السنين، ولقد بدأنا نستشف مكاننا فى الكون ونعرف أن العالم المحيط بنا أكثر غنى إلى حد يتجاوز قدرتنا على تخيله. والعصر الذى لم نكن فيه سوى لعب لقوى غامضة يبدو بعيدًا تمامًا. ومن المدهش أن هذه المسيرة نحو المعرفة تعتبر أيضًا توسعًا فى الحرية. وبعيدًا عن الحصول على إجابة جاهزة وقاطعة فى عالم قاتم ومتصلب، حصلنا

على وعى بانتمائنا لعالم لا تزال معرفتنا به ضئيلة، لكن تهيمن عليه سلطة التنوع والاختلاف. ولدى الإنسان الآن وسائل للسيطرة على مصيره. لكن مازال الطريق المطلوب قطعه طويل إلى حد أنه لا يمكن إلا أن يثير الأشواق.

ومع ذلك لا يجب أن يخفى تقدمنا المدهش فى معارفنا خلال النصف الأخير من القرن العشرين، الحقيقة. ولا يجب أن نعتقد أن المدخل غير المنطقى للعالم سيكشف عن ماضٍ منصرم. ولا تزال الحملات ضد العلم كثيرة وليست مقصورة على بضع أصوليين دينيين متعصبين وقصيرى النظر. فكل من لا يفهمون طبيعة مسيرة العلم يتخذون موقفًا وقحًا بالنسبة للعلم ويميلون إلى رفضه. ويشمل ذلك هؤلاء الذين يعتقدون أن العلم هو سبب كل مصائبنا، مثل هؤلاء الذين يصغون إلى ما لا يقبله العقل من كل نوع. أو أولئك الذين يفيضون في الحديث عن العالم دون معرفته. وإنها لمفارقة الاعتقاد بأن العلم قد يكون مسؤولاً عن تعاستنا بينما نسافر بالطائرة والسيارة، ونشاهد التليفزيون ونستخدم الهاتف، ونطالب بأفضل رعاية فى المستشفيات، والحصول على الدفء والإضاءة بالكهرباء إلخ.. ولا يجب أن نفهم أن استخدام العلم بواسطة البشر؛ أى بواسطة المواطنين، هو وحده موضوع الخلاف، ولا العلم نفسه. فهو ليس جيدًا ولا سيئًا فى حد ذاته. وعندما يتلقى ضحية رصاصة بندقية، فإن الجانى هو الذى أطلق النار، وليست قوانين المقذوفات.

ومن المحاولات المعرفية البدائية المتعثرة فى العصر الذى كانت فيه الأسرار تكتنف الكواكب، وكان يتم ربطها بالتالى بالقوى فوق الطبيعية، بقيت معتقدات تبدو مثيرة للسخرية تمامًا مثل: العرافة بالتنجيم وحكايات "الأطباق الطائرة". وترك لنا هذا الماضى الذى انقضى الآن بضعة محتالين يستفيدون من سرعة التصديق لدى الإنسان. ومن الواضح أن موقع الكواكب فى لحظة مولد فرد ما (أم مولد إدراكه؟) ليس لها أى تأثير على مصيره ولا يمكن للمرء إلا أن يسعد بها. كذلك فإن أفضل علماء الفلك الذين يفحصون السماء بأجهزة أكثر فأكثر قدرة، المتأهبة لأن ترصد فى بضع لحظات ظهور كل نجم جديد بين عشرات الملايين

المعروفة المماثلة له فى السطوع، لم يروا أبدًا أدنى إنزال لكائنـــات مـــن خـــارج الأرض. لكنهم أول المقتنعين بوجودهم المحتمل بين النجوم التى لا يمكن حصرها، وهم يبحثون بشكل جاد عن علامات وجود هذه الكائنـــات ويـــستعدون بزجاجـــات الشامبانيا لاستقبالهم!

ولا يوافق أى عالم على صدق هذه الحماقات، لكن الأمر يتعلـــق بمواقـــف مخالفة للعقل أكثر غموضًا وكذلك خطيرة تمامًا. فبعض الفلاسفة يزعمون، مـــثلاً، أننا لا يمكننا التمييز بين الحقيقة والخطأ، وأن العالم المحيط بنا ليس سوى أوهـــام وأن كل النظريات تتساوى. ويبرهن لنا تاريخ المغامرة العلمية على العكس. وأمام هذه المواقف الشكوكية فإننى أميل إلى سحب الكرسى الذى سيجلسون عليـــه لكـــى أسألهم، عندما ينكفئون، ما إذا كان الألم الذى شعروا به، والذى يعود إلـــى مجـــرد الجاذبية، ليس إلا وهمًا. وليس التأكيد على أن كل الآراء تتساوى إلا خطوة أولـــى قبل الانقلاب إلى مذهب النفى negationnisme.

وهناك فلاسفة آخرون أو متخصصون فى العلوم الاجتماعية أكثـــر جاذبيـــة بكثير، وكثيرًا ما تكون أفكارهم خصبة، لا يؤدون خدمة للعلم عندما يـــستخدمون، خارج سياق كلامهم، مصطلحات علمية لا يفهمون معناها. وتثبـــت لنـــا الأمثلـــة الحديثة أن اختيار الكلمات لا يمكن معالجته بالطلاقة وأنه ليس هناك أبدًا مـــا هـــو بالدقة الكافية.

وبعض العلماء الذى أنجزوا مساهمات مهمة فى مجالات أبحاثهم، يستسلمون أحيانًا لأبحاث مجردة تسترجع الخرافات البدائية، ويؤثر فينا أن نلاحظ يوميًا كيـــف أن الأنساق المنظمة تتولد عن فوضى أولية، عندما يتعلـــق الأمـــر بالكواكـــب، أو بالمجرات أو بالحياة. وهل يجب لهذا السبب أن نرى فى هذه الأنساق أدنى قصدية؟ لا يوجد ما يسمح بإثبات ذلك فى الوقت الراهن. ووجود إرادة مهما كلـــف الأمـــر تمنح الكون قصدية، يشير إلى أن بعض العلماء المعاصرين لم يتطعمـــوا بتـــاريخ نظرية مركزية الأرض والاضطهادات التى تسببت فيها هذه النظرية. وبنهجهم هذا

يعيدون وضع الإنسان فى مركز الكون. وفى الجدل حول "قياس الطاقة اللامتاحة entropie ومركزية البشر anthropie" يتذرعون بالتعقيد المتزايد من النجم إلى الكوكب، ثم من الكوكب إلى الإنسان؛ لكى يوحون بأن الإنسان هو هدف الكون. يا له من طموح مفرط! ويا له من جنون عظمة! ويا له من نكوص! إنهم يشبهون الأطفال الذين يعتقدون بأنهم مركز العالم وينفجرون فى الصياح إذا لم يعطهم أحد الاهتمام المقصور عليهم الذى يرغبون فيه. ولا يبدو أن فكرة أن الكون كان هدفًا وكان يجب أن نكون بالذكاء الكافى لكى نكتشفه، ونصبح نحن أنفسنا هذا الهدف، أكثر معقولية من تخيل الأرض ثابتة فى مركز الكون والسماء تدور حول الأرض. وببساطة فإن هذه الرؤية المركزية nombriliste المعاصرة تتزين بمصطلحات علمية مما يجعلها تبدو أكثر جدية إلى حد ما.

وشغفنا بالكون الذى اكتشفه لنا علماء فلك القرن العشرين، وإعجابنا بقوة المنطق العلمى، لا يعنى كذلك أنه يجب الشروع فى حملة مضادة للدين تكون شاغلنا الشاغل. ويتبع العلم والدين حاليًا طرائق تبعد كل منهما عن الآخر كثيرًا. والرغبة فى البرهنة العلمية على الله ليست أكثر صوابًا من العكس. والاعتقاد أو عدم الاعتقاد فى إله يعتمد بشكل خاص على التعليم الذى يتلقاه الإنسان ومن الوسط المألوف. وتشبه الأديان حاليًا مجتمعات تتشارك فى التقاليد، فى ثقافة وأخلاقيات، وتلعب دورًا اجتماعيًا مهمًا. ووحده التعصب الدينى، والتبشيرية العنيدة، والأصولية العدوانية، ورفض الآخر هى الأمور غير المحتملة. وفى هذا الصدد أعتقد أن الكلمة الحاكمة هى الكلمة المتسامحة. ويجب أن يقبل المرء ثقافة وتفرد الآخر حتى لو لم يكن يشاركه كل أفكاره. والتنوع هو الذى يصنع ثراء العالم. وفى بداية العلم الحديث لعبت الأديان والخرافات البدائية دورًا ضخمًا؛ إذ أتاحت للعلماء انتقاد النصوص المدونة وتمحيص مناهجهم فى التحليل. ومنذ ذلك الحين، لم تعد الأسئلة المطروحة والأهداف المنشودة هى نفسها. ولم يرتفع شأن الكنسية الكاثولوكية بقرار الإدانة فى قضيتى جاليليو وداروين. وبالطريقة نفسها فإن الحكم الستالينى لم ينل تعظيمًا بمواقفه من البيولوجيا.

ويمكن تصوير العلاقات بين العلم والدين بـرد لابـلاس Laplace علـى نابليون الذى قدم له نظريته الجديدة عن تكـوين المجموعـة الشمـسية:" سـيدى الماركيز لا أجد الله كثيرًا فى نظريتك" هذا ما قاله له الإمبراطور، "سـيدى، هـذا افتراض لم تكن لدى حاجة إليه"، هذا ما أجاب به عالم الفلك.

وبعكس ما قد يعتقد البعض، فإن مبحث أصولنا أمر بعيد المنال. وهو علـى العكس تمامًا من صيغته الأولية. وبعد ألفيات المجادلات والتأملات الفلسفية التـى مهدت الطريق، لعل نهاية القرن العشرين قد شهدت منعطفًا. فللمرة الأولى جمـع البشر حزمة من البيانات تتيح لهم استبعاد أغلب النظريات القديمة المتعلقـة بعلـم نشأة الكون cosmogonique والاتفاق على سيناريو. وحتى لو كانت قـد حـدثت إساءة فهم للكثير من المراحل ونتج عنها خلافات، فإن تراكم الملاحظـات سـوف يتيح لنا أن نختبر بدقة كل جزء من هذا السيناريو. ويجب أن يـستمر استكـشاف المجموعة الشمسية، وتكثيف البحث حول دلائل جديدة فيما يتعلق بأصولنا، ومـن المتوقع أن تتيح لنا عملية الانتقال الدائم هذه بين الملاحظات وتفسيراتها قطع خطوة ضخمة خلال القرون المقبلة. وعندما نجلب إلى الأرض عينات من مـادة بدائيـة مأخوذ القليل منها من كل مكان فى المجموعة الشمسية، ومع تحسين تقنيات تحليل العينات فى المختبر، ومع تطوير النماذج الديناميكية والكيميائية ومع البدء فى جمع معلومات حول المجموعات الشمسية الأخرى، نكون قد أنجزنا تقدمًا مذهلاً. وقـد تثير بعض أفكارنا حول أصل الأرض الابتسام لدى سلالاتنا، بالطريقة نفسها التـى نبتسم بها أمام الخرافات التى ابتكرها أسلافنا، لكنهم سيعرفون أن شيئًا ما قد تغيـر فى نهاية القرن العشرين وأفكارنا حول أصولنا كانت نقطة انطلاق لمعارفهم.

خلق أم أزلية ؟

السؤال حول أصولنا يستحوذ منذ الأبد على عقل الإنسان، ولقد أوجد حـشدًا من حكايات خرافية تحكى عن أصل الكون وعن آلهة وعشائر، وهـو الآن، فـى

صميم العديد من الأبحاث العلمية. ومنذ أقدم عهود التاريخ كان البشر يتجادلون لمعرفة ما إذا كان عالمنا نتيجة تحولات مستمرة أم أنه قد تم خلقه فى يوم ما. ولكن كيف حدث ذلك؟ وابتداء من ماذا؟ لا يمكن توقع الماضى، هذا هو القول لدى المتشككين، لكن اكتشافات القرن العشرين تؤدى إلى تكذيبهم؛ لأن الحقيقة ستظهر أخيرًا. لقد قضى البشر آلاف السنوات يخترعون عوالم خيالية. لكن موقفهم هذا قد تغير، منذ وقت قريب، وخصصوا أجهزة رصد قوية لاكتشاف العالم الحقيقى. والدرس الأول فى هذه المغامرة: لدى الطبيعة قدرة إبداعية أكثر بكثير من كل البشر مجتمعين! والدرس الثانى: نعرف حاليًا، بفضل العديد من القيود التى أظهرتها الأرصاد، ما لم يحدث. ويمكننا أن نتخلص من الخرافات البدائية ونظريات الماضى المتعلقة بنشأة الكون، مهما كانت مبهرة. وهل أضاع الأقدمون وقتهم فى التعلل بالأوهام؟ لا، لأن محاولاتهم المتعثرة مهدت الأرض وساعدتنا على صياغة مفاهيم جديدة. وبدون هذه المحاولات المتعثرة لكنّا عاجزين تمامًا، فى وقتنا الحالى، عن اكتشاف سر أصولنا. ولقد أدى نقد أفكار ومعتقدات أسلافنا إلى مولد العلم الحديث!

هل كانت الأرض والسماء والشمس والنجوم موجودة فى كل الأزمنة؟ هل هى أزلية أم تم خلقها فى يوم ما؟ طرح البشر هذه الأسئلة منذ آلاف السنين فى كل القارات. ولم يتوقف أرسطو عن تقديم فكرة عالم أزلى بدون بداية والدفاع عنها بشدة. وتعارضت هذه الفكرة مع المغزى العميق لدى المسيحيين الذين يعتقدون بعالم خلقه إله. وكان الجدل على أشده حول وجود بداية للعالم من عدمه خلال قرون، وصار فى مركز خلاف متناهى الحدة فى القرن الثامن عشر فى قلب جامعة باريس، المركز العالمى للعلم والمعرفة فى ذلك العصر. وكان هذا النزاع على درجة عنف النزاعات نفسها التى أحاطت، بعد بضعة قرون تالية، بنظريتى كوبرنيكوس وداروين.

ويعتبر البحث عن أصولنا موضوعًا علميًا بالدرجة الأولى، ومع ذلك استحوذت عليه الميتافيزيقا تمامًا قبل الفيزياء، وقدمت كل الأديان ومذاهب العالم

التى كانت تطمح لأن تكون شمولية، تاريخًا لخلق العالم. وبصفته كان موضوعًا لكل التعصبات ولكل التشددات خلال قرون، فإن هذا البحث يعد فى الوقت نفسه تصويرًا رائعًا لعبقرية الإنسان. وفى نهاية القرن العشرين، كشف الإنسان فى النهاية الغطاء عن جزء صغير من أصوله، لكن النزاع كان لا يزال بعيدًا عن أن ينتهى!

ولم يكن السؤال عن أصولنا نزوة بسيطة للفضول العلمى بدون أهمية عملية كبيرة، بل كان دائمًا موضوعًا للنزاعات حامية الوطيس إلى درجة أنه، فى الحالات المتطرفة، كان يتم إعدام غير المدافعين عن "النظرية الصالحة" بالرصاص، أو حرقهم أو شنقهم. ومما يستوقف النظر مع ذلك المدهش ملاحظة أن كل النظم التى طمحت إلى الشمولية كانت احتاجت لأن تفرض، وغالبًا بالقوة، نظرية حول أصولنا. وخلال قرون فرضت الكنائس والمعابد والمساجد وجهات نظرها. لكن الأمر لم يكن متروكًا لتأثير الأديان وحدها. وفى مجرى التاريخ نجد غالبًا فى مثل هذه النزاعات الأيديولوجية حول أصولنا صراع النظم الاجتماعية الاقتصادية للعصر. وخلال أكثر من ١٥٠ عامًا، فى عصر هيمنة فرنسا وإنجلترا على العالم، كان النهجان الفرنسى والإنجليزى يتعارضان حول مفهومين لنشوء الكواكب. وبين عامى ١٩٤٥ و١٩٩٠، ارتكز النزاع على نظريتين، نظرية المدرسة الأمريكية ونظرية المدرسة السوفياتية!

ومع أن دراسة أصولنا يهم علماء الفلك بالدرجة الأولى، وعلماء الفيزياء والكيمياء والرياضيات وعلماء المعادن والجيوفيزياء والكثيرين غيرهم، فإن له من التضمينات الفلسفية والاجتماعية ما يجعله يستمر فى إثارة الأهواء بل والمجادلات أحيانًا. وحتى بين العلماء تكون النزاعات متعددة. وطرائق الاستكشاف المختلفة على درجة عالية من التنوع حتى أن الكثير من الكتاب يتجاهلونها عمدًا. وبدراسة النصوص المكرسة للسؤال حول أصولنا، يقابلنا "فلاسفة" أكثر مما يقابلنا من "مهندسين" وفى بعض الأحيان ميتافيزيقا أكثر من الفيزياء، لكن الموقف فى طريقه إلى التغير. ويتيح البحث الفضائى وتطور طرائق الرصد والتحليل أدوات ذات

قدرة عالية تجعلنا نعيش ثورة حقيقية فى تاريخ اكتساب المعارف، ولا تجعل أحدًا يتجاهل بعد ذلك القيود التى تضعها الأرصاد والنماذج.

ويظهر لنا بوضوح حاليًا أن الأرض والقمر والشمس والنجوم والأجرام السماوية تشكلت ذات يوم وأنها تطورت. وكان أسلافنا يفكرون بطريقة مختلفة. كان الكثير منهم يعتقد أن الكواكب والنجوم كانت دائمًا فى مكانها هذا منذ الأزل وسوف تظل هناك إلى الأبد؛ أى أن فكرة التطور نفسها كانت غريبة بالنسبة للإنسان. وكانوا يتعلمون أن قوة عليا قد خلقت العالم مرة واحدة وإلى الأبد. ومن الصحيح أن هذا المفهوم عن بداية وتطور ومن ثم نهاية يعتبر مفهومًا مثيرًا للبلبلة. ويقابلنا فى أيامنا هذه هذا الرفض للتطور فى قلب بعض الطوائف وجماعات "الأصوليين"، أو حتى فى قلب البلدان المتطورة تقنيًا مثل الولايات المتحدة، لدى "الخلقويين creationnistes". وخلال آلاف السنوات كان البشر قد وضعوا آلهة فى السماء لهم نظم حياة مختلفة لكنهم كانوا يشبهون البشر إلى حد بعيد. وكانوا يتميزون عنا بميزة هائلة، وهى الخلود. ونقول حاليًا إن الأمر يتعلق بميزة صورية فقط؛ لأن الكائنات الخالدة لا يمكنها أن تتطور! لكن بعض الناس يرفضون الاعتقاد بأننا لسنا سوى عبيد سذّج لأهواء سماوية. ولقد طرحوا أسئلة مختلفة: هل يوجد، فى نهاية الأمر، قوانين تحكم هذا الكون؟ وهل يمكن لنا اكتشافها بملاحظة العالم المحيط بنا؟

وفى غياب الأرصاد المُلزمة، نعم علماء النظريات بهذا الأمر خلال عدة قرون، متخيلين الحالات الأكثر تنوعًا. وبالنسبة لكثير من هذه النظريات، كان العديد من الفرضيات فى النطاق الميتافيزيقى. ويجب أن ندرك جيدًا أنه فى النطاق العلمى لا توجد فرصة سلامة خارج الحدود الرصدية. وكم من النظريات الجيدة "نظريًا" التى قضت عليها الحقائق المروعة! ومهما كانت انحيازاتنا وتفضيلاتنا، يجب أن نخضع إلزاميًا لحقائق الملاحظة. ويقدم العلم هنا درسًا جيدًا للبشر فى التواضع، سيان كانوا سياسيين حاكمين أو تنفيذيين! ولابد لكل النظريات أن تلتزم بقالب القيود الرصدية. ولن يتكشف الفكر الخالص، والأفكار القبلية، و"الكتب

المقدسة العظيمة" عن منفعة كبيرة، ولقد أهمل العناد الدليل لكى يظل على اعتقاد أفضل بخرافة تأسيسية كانت رادعة غالبًا. وبالعكس فإن التحليل النقدى لهذه الأنواع من "القبلية a priori" وبشكل خاص المطابقة مع الأرصاد أظهرا أنهما مثمران.

وكل تاريخ البحث عن أصولنا هو تعاقب خلال عدة قرون لأفكار مسبقة، ولترددات ومآزق مع افتقار، قاس غالبًا، للقيود الرصدية وبضعة تطورات مدهشة. وحسب تعبير بول فاليرى Paul Valery "كلما زادت الميتافيزيقا قلت الفيزياء والعكس بالعكس"!

وهذه المشكلة حول أصولنا تشبه إعادة تجميع صور فى لعبة هائلة من الأشكال المقصوصة، ولزيادة المتعة، فإننا لا نعرف العدد الكلى للأشكال ولا موضوع اللوحة الأصلية التى تساعدنا فى تجميع الأشكال المنفصلة، ودائمًا كان الكثير من القطع مفقوذا، علاوة على ذلك اختلط الكثير من القطع. فمثلاً، نحن نجهل أى قطع يفشى لنا بالمعلومات حول أصولنا وأى قطع أخرى تروى لنا بقية القصة. وحتى مع حصولنا حديثًا على قطع كثيرة تكميلية، يبقى أن نعرف أين نضعها، وعلى الرغم من أننا نرى الصورة بمزيد من الوضوح، تظل معالم كثيرة فى الخفاء.

وتأتى الصعوبة الأساسية في الواقع من أن المجموعة الشمسية هى المجموعة الكوكبية الوحيدة التى تعتبر تحت تصرفنا. فهل نحن نعيش فى مجموعة لا يُحتمل تكرارها وفريدة من نوعها؟ وهل المجموعة الشمسية شاذة الخلقة؟ أم أننا نعيش فى مجموعة عادية وشائعة جدًا فى المجرة؟ من الواضح أن اكتشاف مجموعات شمسية أخرى سوف يتيح لنا استخلاص خواص شائعة واستبعاد ما لا يكون مطابقًا بسبب شروط أولية خاصة. ونحن الآن إلى حد ما فى موقف، انطلاقًا من ملاحظة فرد واحد، نحاول فيه أن نستنتج من هذه الملاحظة قواعد عامة للحياة فى مجتمع. ما الصفات الخاصة فى مجمل مجموعة ما؟ وما الخاص فى فرد؟ هل هى أن تكون العينان زرقاوتين أم أن يكون للفرد ساقان؟

وترتبط الصعوبة الثانية بحقيقة أنه من المزعج الرجوع إلى الماضى، ويبدو من الممكن أن نجد الشروط الراهنة انطلاقًا من شروط أولية مختلفة. وحتى الآن ليس لهذه المشكلة حلاً وحيدًا. ويمكن تصور عدة شروط أولية مختلفة تؤدى كلها إلى ما نرصده حاليًا.

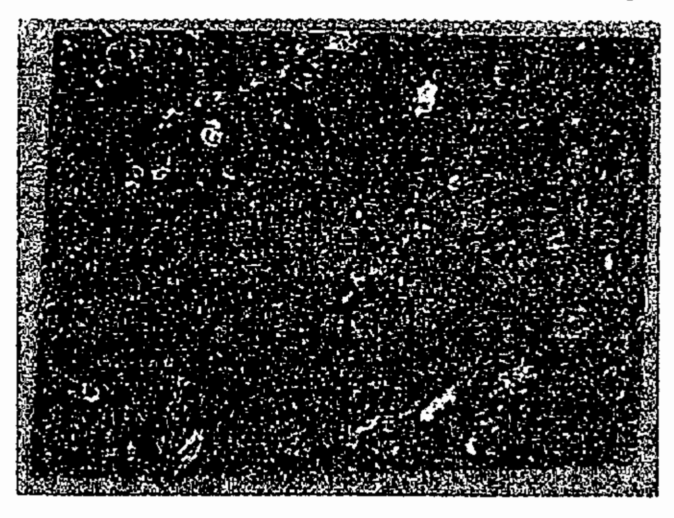
ومن ثم فإن البحث الفضائى مثل كل الأرصاد الحديثة حمل كمية هائلة من المعطيات، وتكمن المشكلة فى معرفة أى هذه المعطيات يرتبط بنشوء المجموعة الشمسية، وتخبرنا هذه الكمية الهائلة من المعلومات التى تجمعت خلال العقدين الماضيين بشىء واحد على الأقل: المشكلة أكثر تعقيدًا بكثير مما توقعناه. ومما يثير الذهول، بشكل خاص، التنوع الضخم للأجرام والآليات التى تم رصدها. والطبيعة دائمًا أكثر ثراء مما كنا نتوقع بشكل مسبق! ولديها فى كل الحالات خيال أكثر بكثير من خيال أمهر علماء النظريات أو الفلاسفة.

علوم آثار السماء

انطلاقًا من أية أرصاد سنعيد تأسيس قصة أصولنا؟ وعلى أى سيناريو عن نشوء المجموعة الشمسية أن يُدخل فى اعتباره بالطبع ليس فقط كل الأرصاد، ولكن أيضًا أن يتعرض مرة ثانية لمجازفة أن يتم استبعاده فى النهاية. وتسلك هذه المعطيات كما لو كانت قيودًا على بنية كل سيناريو. وبينات اللحظات الأولى للمجموعة الشمسية التى يعتمد عليها علماء الفلك ذات طبيعة متعددة: التركيب الكيميائى، وديناميكا الكواكب، وقياسات النشاط الإشعاعى، وتعداد الحفر، ودراسة النيازك والمذنبات، وأرصاد النجوم الأخرى.. إلخ. وبالطبع ليس من الممكن استعراض كل هذه المعلومات؛ لأن الأمر قد يحتاج إلى دائرة معارف، وسنكتفى هنا بتقديم بعضها. (الشكل ١ و٢).

وبدأ يتضح بيان محتوى المجموعة الشمسية بعد ٣٠ عامًا من الاستكشاف الفضائى. وكانت الأجرام الأقل ضخامة، مثل: النيازك، والمذنبات، والأقمار

الصغيرة، ونوى الكواكب، أو أيضًا الأحجار النيزكية، قد شـــهدت تغيـــرات قليلـــة نسبيًا خلال نشوئها،



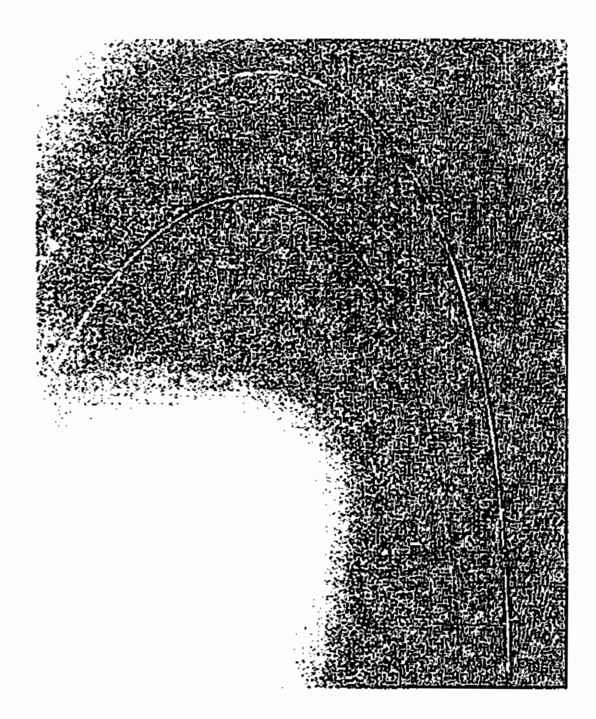
شكل (١)

الحجر النيزكي أليند Allende

عُثر عليه في ١٩٦٩ في المكسيك، وقد حفظ في قلبه معلومات قيمة حول ما حدث منذ أكثر من ٤,٥ مليار سنة في المجموعة الشمسية الوليدة.

لذلك فإنها تتيح لنا استعادة جزء من الشروط الأولية، وتوضح لنا حقيقـــة أن الكواكب تدور في السطح نفسه على دوائر وأن قرص من المادة، في حالة دوران حول الشمس الوليدة، قد سبق نشوء الكواكب. ونشأ الجزء الأكبر مـــن التركيـــب الكيميائي لكوكب ما أو قمر، من درجة الحرارة التي تسيدت في فترة النشوء؛ لذلك فإنها تمدنا بمعلومات أساسية. ويشهد العدد الكبير من حفر التصادم المرصود على سطح أجرام المجموعة الشمسية بكثافة وتأثير القصف في عملية التكوين، ويُقـــاس عمر الأرض حاليًا بدقة بفضل النشاط الإشعاعي radioactivite وبطرق الأريـــخ datation.

وحديثًا يجمع علماء الفلك معلومات دقيقة عن ماضينا برصد النجوم الأخرى وبيئاتها، وفى استطاعتهم بهذه الطريقة رصد نجوم قبل نشوئها بالضبط. والأكثـر شبابًا من بينها تكون محاطة بقرص من المادة وتبث نفثات قوية فـى الاتجـاهين القطبيين، وربما تكون الشمس قد شهدت مثل هذه الأحداث. ولقد تم اكتشاف عـدة عشرات من الكواكب فى أقل من خمس سنوات حول نجوم قريبة. وهـى مختلفـة تمامًا عن تلك التى نعرفها، لكن لدينا أملاً كبيرًا فى اكتشاف أراض أخرى خـلال القرن الواحد والعشرين.



الشكل (٢)

أقواس نبتون Nepton.

تم اكتشافها فى ١٩٨٤ بواسطة أ. براهيك A. Brahic و و. هوبارد W. Hubbord، والتقطت صورها الفوتوغرافية فى أغسطس ١٩٨٩ بواسطة المسبار فوياجير ٢ Voyager 2.

والحلقتان اللتان يمكن رؤيتهما فى هذا المستند أُطلق عليهما اسمى لا فيرييه Le Verrier (حلقة داخلية) وآدمس Adams (حلقة خارجية).

والحلقات الثلاث الظاهرة على اليمين أُطلق عليها من أسفل إلى أعلى ليبرتيه Liberte، إجاليتيه Egalite، وفراتيرنتيه(٦) Fraternite.

وتبدو هذه الأقواس متقاربة ليس فقط فى الاتجاه القطبى، لكن أيضًا على السمت azimut.

وفى الأسفل شمالاً يمكن تمييز الكوكب نبتون حيث تعرضت الصورة للضوء بإفراط شديد لكى تسمح برؤية الحلقات، ويأتى الضوء الشمسى من الشمال.

ويجب أن تتيح لنا معرفة آلية تجاور الأقواس فهمًا أفضل لمرحلة فى عملية نشوء الكواكب.

سيناريو عن أصولنا

إذا أخذنا بعين الاعتبار كل حقائق الرصد المتجمعة يمكن الآن رسم الخطوط العامة لقصة نشوء المجموعة الشمسية، وحتى لو بدا أن هذا السيناريو مقبول من غالبية علماء الفلك، ليس معنى ذلك أنه صحيح لهذا السبب! والأجدر أن نعتبره كأداة باهرة ترشد التفكير العلمى، لكنها قد تحتاج فى يوم ما إلى مراجعة عميقة. وحتى لو كانت بعض مراحل نشوء الكواكب مازالت مجهولة لدينا إلى الآن، يمكننا على الأقل إثبات "كيف لم تنشأ المجموعة الشمسية بطرائق أخرى"!

ومع نهاية القرن العشرين يمكن القول بأن المجموعة الشمسية "ابنة الزمن". ولقد مر أكثر من عشرة مليارات سنة بين أول ارتجافات "الانفجار العظيم" وميلاد الشمس و٤,٥ مليار سنة بين ظهور الأرض ومجئ الإنسان. ولقد أتاحت هذه المدد الفلكية من جانب فى تصنيع كل الذرات اللازمة لأرضنا ومن جانب آخر فى أن يُتاح للتطور الزمن المطلوب لكى يصل إلى كائن بهذا التعقد، ومفاجئ إلى هذه

---

(٦) أى على التتالى: الحرية، والمساواة، والإخاء. (المترجم)

الدرجة، وبهذا النقص، مثل الإنسان. ومع معرفة كيفية ظهور الأرض وكيفية تطورها أصبح من الممكن معرفتها بشكل أفضل وفى الوقت نفسه القدرة على التنبؤ الأفضل بمستقبلها، وربما فى يوم ما قد نتحاشى كذلك بعض الأحداث المزعجة.

ومن المسلم به فى حاليًا أنه فى جزء ما من المجرة، منذ نحو ٤,٥ مليار سنة، انهارت سحابة من غاز ما بين النجوم تحت تأثير ثقلها الخاص لكى ينشأ عن ذلك نجم - الشمس - وحاشيته من الكواكب. وخلال انهيار هذا السديم البدائى تسطح لتكوين قرص غازى أصبح انتفاخه المركزى هو الشمس. وفى قلب القرص، تكثف الغاز قبل كل شىء إلى حبيبات صغيرة. وجمّعت حالات عدم التوازن المحلى بسرعة هذه الحبيبات على هيئة أجسام أبعادها بضع مئات الأمتار. وأنتجت لعبة التصادمات المتبادلة هذه أجنة كوكبية تصل أبعادها إلى بضع مئات الكيلومترات، ثم الكواكب والأقمار التى نعرفها، وأتاح وجود الماء السائل على كوكبنا تطور كيمياء عضوية معقدة وازدهار الحياة. وحتى لو كانت هذه الخطوط العريضة تبدو مقبولة، هناك عدة حلقات فى السلسلة تعتبر غير مفهومة كليًا إلى درجة أن جوانب كاملة من هذا السيناريو لم يتم حل رموزها بعد. وكما قال بيير داك Pierre Dac "الحلقة المفقودة بين القرد والإنسان، هى نحن".

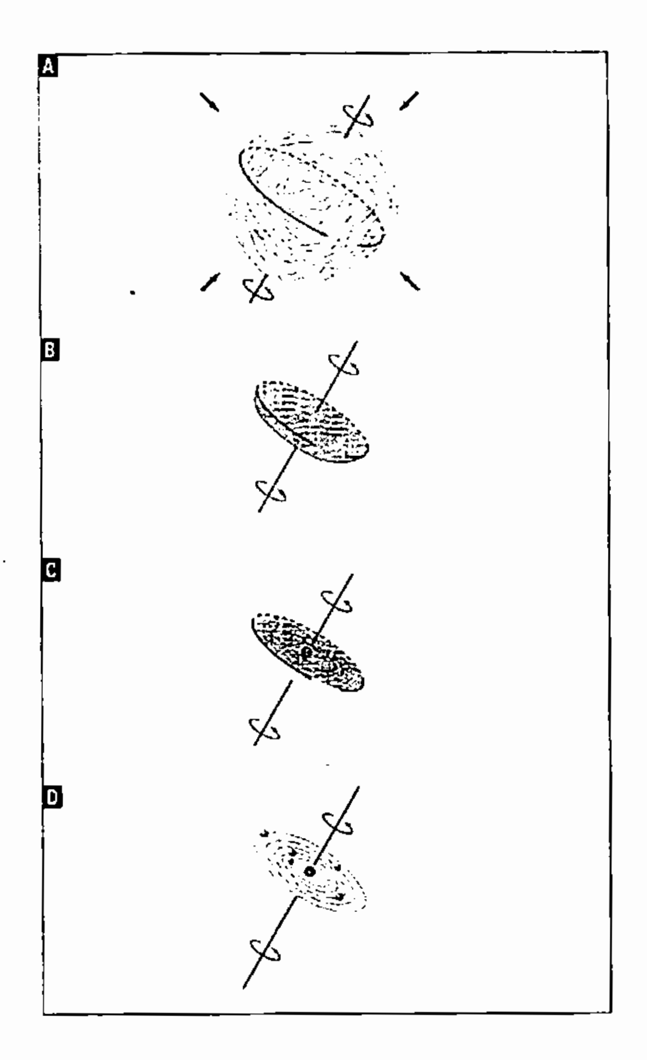
ومنذ ٤,٥ مليار سنة، كانت الشمس الفتية، الخارجة توًا من انهيار على نفسها، أكثر لمعانًا بمقدار عشرات المرات مما هى عليه اليوم وكانت مطمورة فى سديم من الغاز ومن حبيبات تسطحت بعد ذلك على هيئة قرص تحت تأثير قوة الطرد المركزى واللزوجة. وهذا القرص هو الذى أتاح الفرصة لميلاد الكواكب. ويطلق عليه علماء الفلك "القرص ما قبل الكوكبى proto - planetaire". ويمر هذا القرص بخمسة أطوار: قرص غاز، وقرص حبيبات، وقرص كويكبى planetesimaux، وقرص أجنة وقرص كواكب (الشكل ٣ و ٤).

وبعد أن تبرد الشمس بشدة، فى نهاية تشكلها، يتجمد جزء من قرص الغاز (نحو ١ فى المائة) على هيئة حبيبات مجهرية. وبعيدًا عن الشمس، كان القرص

باردًا وظهرت قطع جليدية من الماء، ومن الميثان، ومن محلول النشادر ومن أكسيد الكربون. وكانت درجة الحرارة أكثر ارتفاعًا بكثير بالقرب من الشمس، وظهرت عناصر صامدة للحرارة مثل: أكسيد الألومينيوم، أو بعض المركبات الصامدة للحرارة من الكالسيوم والمغنيسيوم والأكاسيد المعدنية. ومن ثم فإن التركيب الكيميائي للمجموعة الشمسية نتيجة مباشرة لاختلافات درجة الحرارة في القرص ما قبل الكوكبي.

ومع الاحتكاك بالغاز فقدت الحبيبات جزءًا من طاقتها المدارية وتجمعت في قرص ضيق جدًا يقع في مستوى خط استواء السديم الغازي. فإما أنه قد نتج عن حالات عدم الاستقرار الجاذبي انهيار غبار في أجرام، يطلق عليها "الكويكبات"، وتتراوح أبعادها بين ٥٠٠ متر وكيلومتر، وإما أن أعاصير جمّعت الحبيبات لتشكيل أجرام على المقاس الكيلومتري. وفي الحالتين فإن "الكويكبات" تكوّنت في بضعة آلاف من السنين.

واحتوى السديم ما قبل النجمي حينئذ على قرص كويكبات بدأت في الالتصاق ببعضها البعض لتكوين أجنة كوكبية، ذات أبعاد نموذجية تصل إلى بضع مئات من الكيلومترات، ولقد نشطت دراسات مولد هذه الأجنة منذ أكثر من عشرين عامًا.

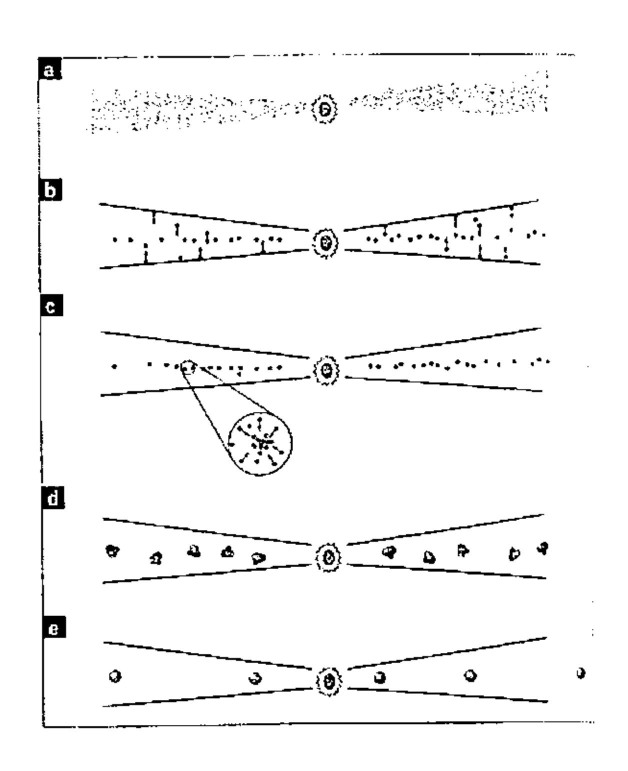


الشكل (٣)

نشأة المجموعة الشمسية.

السديم البدائى "أ"، الذى يتكون من غاز وغبار، انهار على نفسه، مثل متزلج يسحب ذراعيه على طول الجسم، ويدور أسرع وأسرع حول نفسه.

وشكّل السديم قرصًا أكثر فأكثر تسطيحًا "ب"، وظهرت حبيبات فى هذا القرص "ج"، ثم بعد ذلك كويكبات، ثم أجنة، ثم كواكب ليصل إلى المجموعة التى نعرفها فى الوقت الراهن "د".وانتقال القرص "ج" إلى المجموعة "د" موجود بالتفصيل فى الشكل التالى.



الشكل (٤)

المراحل الخمس الرئيسية لنشوء الكواكب.

يجمل هذا الرسم التوضيحى مفهومنا الراهن عن نشوء الكواكب، وهو يوضح تشكّل قرص غاز "أ"، يتبعه رسم لقرص من حبيبات تهاجر فى مستوى خط الاستواء "ب"، ثم قرص كويكب "ج".وتشكل هذه الأجرام الصغيرة، التى تتراوح أبعادها بين بضع مئات الأمتار وبضع الكيلومترات، قرص جنين كواكب "د"، ثم كوكب فى نهاية الأمر مثل الذى نألفه "و".

ويتحكم بارامتران مهمان فى نمو الأجنة: سرعة انطلاق الكويكبات، وهى سرعة أقل من تلك التى ينجذب بها جرمين عن طريق الجاذبية، والسرعة النسبية للتصادم بين هذين الجرمين. فإذا كانت السرعة الأخيرة أكبر من سرعة انطلاق الكويكبات، بما يصل إلى نحو عشرة أمتار فى الثانية، لا يستطيع كويكبان عند تقابلهما أن يلتصقا وعندئذ يصبح النمو مستحيلاً. وبالعكس، إذا كانت السرعة

النسبية أقل بكثير من سرعة الانطلاق، يمكن أن يحدث التصاق ويمكن أن تظهر الأجنة. وتم اقتراح سيناريوهين للنمو في السبعينيات والثمانينيات بواسطة المدرستين السوفيتية والأمريكية. وفي إحدى النماذج تنمو الأجرام كلها بالسرعة نفسها، وهذا هو النمو العادى. وفى الآخر، تنمو الأجرام الكبيرة فقط في منطقة محددة في القرص تكون أكثر كثافة، فيجذب بفاعلية أكبر الكويكبات التي تتحرك على مدارات قريبة منه، و"يأكل" كل الأجرام المجاورة له، مما يجعله يتضخم من جديد وهكذا على التتالى. هذه هى ظاهرة "كرة الثلج". وما بين السيناريو الأول نصير المساواة والثانى الأكثر نخبوية أترك لك تخيل أيهما قدمه السوفييت وأيهما قدمه الأمريكيون! غير أن التجميع accretion العادى يكون أكثر بطئًا بكثير: يحتاج الأمر إلى ١٠٠ مليون سنة على الأقل لتكوين الأجنة؛ لذلك يبدو أن التجميع بظاهرة كرة الثلج هو الآلية المناسبة، ويستمر بالكاد مائة ألف سنة.

وبسبب وجود جليد على بعد شاسع من الشمس، تكون أجنة الكواكب العملاقة أكثر ضخامة بكثير من أجنة الكواكب الأرضية. وعليه فإنها تكدس على سطحها جزءًا من الغاز المحيط بها. وعندما يتخطى الغاز المتراكم كتلة حرجة محددة (نحو عشر مرات كتلة الأرض)، عندئذ يحدث عدم اتزان هيدروديناميكى؛[٧] حيث تتراكم فى وقت بالغ القصر كمية هائلة من الغاز. ومع انتهاء هذه العملية يطوق أجنة الكواكب العملاقة هذه غلاف جوى مرتفع الكثافة من الغاز، يضاهى ما يُرصد حاليًا.

وبعد مرحلة التجميع بظاهرة كرة الثلج، يتكون القرص من نحو مائة جنين من الكواكب تكون قد استهلكت كل المادة الكوكبية فى حملها. وتعيش أولاً منفصلة كل منها عن الآخر على مدارات دائرية. ثم يختل نظامها بسرعة من ناحية الجاذبة وتصير مداراتها إهليلجية الشكل أكثر فأكثر، حتى تتلاقى. عندئذ تعانى الأجنة من تصادمات جبارة. وبسبب كتلتها الكبيرة جدًا، لا تستطيع الشظايا الناجمة عن

---

(٧) هيدروديناميكا أو هيدروديناميى hydrodynamique: ما يتعلق بعلم قوة الموائع. (المترجم)

التصادمات أن تهرب من الأجرام الأصلية فتتجمع من جديد لتكــوين أجنـــة أكثـــر ضخامة بكثير. ويرى بعض علماء الفلك أن القمر قد تكوّن نتيجة مثل هذا التصادم العملاق بين جرم ذى أصل أرضى proto - Terre وجنين مجاور: ولعل جزءًا من الشظايا قد تجمع لتكوين القمر.

وعندما تنتهى هذه العملية، بعد ١٠٠ مليون سنة تقريبًا، لا يتضمن القـــرص سوى مجموعة من بضعة كواكب فتية، يمكن أن تكون مجموعتنا الشمسية. ووجهة النظر هذه المثالية بعض الشيء تخفى فى الحقيقة الكثير من المشاكل: لم يتوصـــل علماء الفلك إلى تكوين مجموعات كوكبيـــة مثـــل مجموعتنـــا باســـتخدام أجهـــزة الكمبيوتر. ويبدو الأكثر سهولة تكوين بضعة عشر من كواكب صـــغيرة لا تـــسعة كواكب فقط. ويضاف إلى ذلك أن مدارات الكواكب التى تم الحصول عليها خـــلال عمليات المحاكاة الرقمية إهليلجية أكثر مما هو موجود فى المجموعة الشمسية.

وتكون الكواكب فى بداية حياتها بالغة السخونة ثم تبرد بالتدريج خلال عـــدة مليارات من السنوات. عندئذ تلحق بها تحولات شديدة. قبل كل شيء فإنها تتشكل: فالعناصر الأكثر ثقلاً، مثل المعادن، تهبط نحو قلب الكوكب لتكوين نواتـــه، بينمـــا تظل العناصر الأخف، مثل السيليكات، على السطح وتكوّن القشرة. غيـــر أنـــه لا يجب أن يكون التبريد بالغ السرعة وإلا توقفت عملية التطور هذه قبـــل اكتمالهـــا: يلعب وجود العناصر الإشعاعية دورًا حاسمًا للوصول إلى درجة حـــرارة داخليـــة تصل إلى عدة آلاف من الدرجات خلال عدة مليارات من السنوات، ممـــا يجعـــل التطور الجيولوجى ممكنًا. وبدون هذه العناصر الإشـــعاعية لكانـــت الأرض قـــد أصبحت كوكبًا ميتًا من الناحية الجيولوجية حيث لم يكن للحياة أن تظهر. وبفـــضل هذه العناصر التى تسخّن مركز الأرض، تنشأ القارات وتتولد البـــراكين، وتعـــيش وتهمد: إنها محرك الآلة "الأرض". وخلال مرحلة التبريد تنسل الغازات الموجودة فى الصخور هاربة من جرم الكوكب. فإذا كانت كتلة الكوكب كافية، فإنه يزدهـــى حينئذ بغلاف جوى رقيق، لا غنى عنه بالنسبة للحياة. وبالمقابل فإن الأجرام الأقل

ضخامة بكثير، مثل عطارد أو القمر، لا يمكنها المحافظة على أغلفتها الجوية بسبب الجاذبية غير الكافية.

وبعد مليار من السنوات ظهرت الأنواع الحية على الأرض قبل كل شيء على هيئة خلايا منفردة، ثم أصبحت أكثر فأكثر تعقيدًا خلال تطورها. ولقد غيرت بيئتها بشكل جذرى وخاصة الغلاف الجوى بأن حولت الغاز الكربونى إلى أكسجين. وخلال هذا المليار الأول من السنوات، خضعت أيضًا كواكب المجموعة الشمسية الفتية لقصف كثيف، كما تشهد بذلك حاليًا الأسطح المحفورة بالقذائف craterisees للكواكب والتوابع. ويعتقد البعض مثلاً أنه من المحتمل أن جرمًا ذا ١٠ كيلومترات، تبقى من عملية تكوّن الكواكب، قد تحطم على الأرض فى الدهر الوسيط ere secondaire وكان مسؤولاً عن اندثار ٨٠ فى المائة من الأنواع الحية. وبعد تلك الكارثة ظهرت أسلاف الأنواع الحية الراهنة، خاصة الثدييات. لكن هذه قصة أخرى...

وليس السيناريو الذى وصفناه توًا مجرد قصة متصلبة: لقد نتج، فى نهاية القرن العشرين، عن فكرة عقلية إيجابية بدأت منذ القرن الثامن عشر. وهى تصور إلى أى مدى يُعتبر البحث عن أصولنا، وهو بعيد عن أن يكون مجرد موضوع فضول، هو أفضل طريقة لأجود معرفة بالأرض والكواكب، وفى الخاتمة، الأفضل فى حسن تقدير الأرض والكواكب والسكن فيها، وهو تصور جيد أيضًا للمنهج العلمى، الذى بخضوعه المطلق للحقائق، وذهابه وعودته بلا توقف بين النظرية والملاحظة يتيح تحسين معارفنا. ولا يستمد الفكر العلمى فعاليته إلا لكونه يضع عددًا محددًا من القيم الأساسية – الصرامة، الحذر، والتواضع، والاستقامة العقلية، والعقل النقدى – فى خدمة شغفه: المعرفة. وبإتاحته أيضًا للإنسان البُعد عن المظاهر والعقائد، فإنه يعتبر أيضًا منبعًا للحرية. [٨]

---

(٨) توجد معلومات أكثر اكتمالاً بكثير فى كتاب "أبناء الشمس Enfants du Soleil" الذى نُشر فى عام ١٩٩٩ بواسطة الناشرين أوديل جاكوب Odile Jacob. وبعض الفقرات فى النص أعلاه مأخوذة من هذا الكتاب.

الكواكب واستكشافها[٩]

بقلم: فيليب ماسون

Philippe MASSON

ترجمة: عزت عامر

مقدمة

كانت الأقمار الصناعية والمجسات الفضائية هي المستكشفات الحقيقية للمجموعة الشمسية، وأتى هذا الاستكشاف بعد تقدم منهجي، وكان قد تم التحليق فوق الأرض بواسطة سبوتنيك ١ Spoutnik 1 في عام ١٩٥٧، ثم أتى دور القمر في عام ١٩٥٩ (لينا من ١ إلى ٣ Luna) ثم ما يتعلق بالكواكب الأرضية ابتداء من عام ١٩٦٢: الزهرة (مارينر ٢ Mariner، ١٩٦٢)، والمريخ (مارينر ٤، ١٩٦٥) وعطارد (مارينر ١٠، ١٩٧٤). وتم استكشاف الكواكب الخارجية بدورها (باستثناء بلوتو) بواسطة المسبارين الأمريكيين بيونير ١٠ Pioneer (١٩٧٣) و١١ (١٩٧٣)، أول أدوات لاجتياز حزام الكويكبات، ثم فوياجير ١ و٢ Voyager.

وكان أول من تصدى لهذا الاستكشاف، وكانا الوحيدين لمدة طويلة، هما السوفييت والأمريكيون، ثم لحق بهما باطراد بضع فرق دولية، وبشكل خاص أوروبية. ولم يحدث سوى في عام ١٩٨٥ أن شرع الأوروبيون واليابانيون بدورهم في المغامرة الفضائية بالمسابر جيوتو Giotto (ESA) وساكيجاك وسويسي Sakigake et Suisei (ISAS) التي حلقت فوق المذنّب هالي Halley.

ولقد اتبع الاستكشاف الكوكبي مسيرة منهجية: التحليق عن بعد (مرحلة استطلاع)، والوضع في مدار (مرحلة الرصد)، والهبوط، ثم عودة العينات إلى الأرض والطيران المعتاد (مرحلة الاستكشاف في موضعه الأصلي). هذه هي

---

(٩) نص المحاضرة رقم ١٩٠ التي ألقيت في إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٨ يوليو ٢٠٠٠.

الاستراتيجية التى تم اتباعها للاستكشاف القمرى والتى تجسمت مع الخطوات الأولى للإنسان على القمر فى ٢١ يوليو عام ١٩٦٩. ولا شك أنه سوف يتم اتباع هذه الاستراتيجية لاستكشاف كوكب المريخ.

الاستكشاف القمرى

بسبب قربه من الأرض (٣٨٤٤٠٠ كم) كان القمر من أول الأهداف بالنسبة للسوفييت والأمريكيين منذ بداية الاستكشاف الفضائى. ومن عام ١٩٥٩ إلى عام ١٩٧٦، أطلق السوفييت ٢٩ بعثة نحو القمر، لتحقيق سلسلة من "الريادات"، خاصة اكتشاف الريح الشمسية (لينا ١ فى عام ١٩٥٩)، أول تحليق على الوجه المختفى (لينا ٣ فى عام ١٩٥٩)، أول هبوط ليّن (لينا ٩ فى عام ١٩٦٦)، إنزال مركبة يتم التحكم فيها عن بُعد (ليناكود ١ Lunakhod، ١٩٧٠) التى كان عليها استكشاف نحو عشرة كيلومترات من السطح خلال أكثر من عشرة أشهر، وثلاث مرات عودة بالعينات إلى الأرض (لينا ١٦ فى ١٩٧٠، لينا ٢٠ فى ١٩٧٢، ولينا ٢٤ فى ١٩٧٦).

ولم يبق الأمريكيون بدورهم بدون نشاط؛ حيث أطلقوا ٢٢ بعثة، منها ٦ بعثات لأبولو Apollo وأكثر حداثة البعثتين كليمنتين Clementine (١٩٩٣) ولينار بروسبكتور Lunar Prospector (١٩٩٨). وبعد سلسة من الإخفاقات، أنهوا بنجاح برنامج أبولو الذى أدى ٦ رحلات طيران مأهولة من عام ١٩٦٩ إلى عام ١٩٧٢ والعودة إلى الأرض حاملاً نحو ٣٨٠ جم من العينات.

وأوضح تحليل هذه العينات أن القمر معاصر للأرض (٤,٥٥٥ مليار سنة). وكان له فى الأصل مجال مغناطيسى لم يبق منه حاليًا سوى آثار أحفورية. ولقد تعرض القمر بعد تكوّنه إلى قصف نيزكى كارثى انخفضت كثافته بدرجة كبيرة منذ نحو ٣,٨ مليار سنة، العصر الذى يُعتبر بداية انتشار السيول البركانية الضخمة (بزلت) على سطحه خلال نحو ٦٠٠ مليون سنة، مما نتج عنه نشوء بحار سطح

القمر.[١٠] وعلى وجه الإجمال فإن ٤٠ فى المائة من كتلته تتكون من الأكسجين، و ٢٠ فى المائة من السيليسيوم، و٨ فى المائة من الكالسيوم، و٧ فى المائة من الألومنيوم، و ٥ فى المائة من المغنسيوم و ٤ فى المائة تيتان. وتحتوى تربته أيضًا على كمية مهمة من الهليوم ٣ (١٣ ملليجرام لكل طن) نتجت عن الانفجارات الشمسية.

وبالعكس، فإن أصل القمر مازال لغزًا حتى الآن. والفرضية الأكثر قبولاً عادة حاليًا هى تلك الخاصة بتجمع الحطام الناتج عن اصطدام الأرض الأولية بجرم فى حجم المريخ. وحل هذا اللغز مهم بالأحرى؛ حيث ظهر أن القمر يلعب دورًا موازنًا على محور الدوران الأرضى، ولولا ذلك لتوجه بشكل مضطرب، ولن يحدث ذلك دون نتائج على المناخ وبالتالى على الحياة فوق كوكبنا.

ويبرر العدد الكبير من الأسئلة التى لا إجابة لها متابعة استكشاف قمرنا. ويمكن تقسيمها إلى ثلاثة تصنيفات واسعة:

– علوم القمر: منذ ثلاثة مليارات سنة كان القمر مازال جرمًا بدون نشاط داخلى؛ لذلك فإنه يتيح دراسة المراحل الأساسية لتطور الكواكب الأرضية (المفاضلة، والتطور الكيميائى ونشوء حفر القذائف craterisation).

– علوم تنطلق من القمر: بسبب اتزان تربته، وغياب الغلاف الجوى ومجال جاذبيته الضعيف، يمكن استخدام القمر للرصد الفلكى، وخاصة علم قياس التداخل interferometrie، رغم بعض العوائق (القصف المتوالى بالأحجار النيزكية بالغة الصغر، والتغيرات الحادة فى درجات الحرارة).

– علوم على القمر: بسبب قربه من الأرض، يمكن للقمر أن يقوم بدور قاعدة تجارب للبعثات المستقبلية المأهولة المتجهة إلى المريخ.

وخلال العقد الجارى تواصل الكثير من البعثات الفضائية دراسة قمرنا الطبيعى: سمارت ١ Smart (ESA, 2002)، لونار أ Lunar - A (ISAS, 2003)

---

(١٠)بحار سطح القمر Mers: من تضاريس سطح القمر. (المترجم)

وسيلين Selene (ISAS - NASDA, 2005). ولا تنوى هـذه البعثـات تحقيـق الأهداف الطموحة للعلم ابتداء من القمر وعليه، لكنها ستقدم مساهماتها فى معرفـة أفضل بتركيب القمر وبنيته الداخلية.

استكشاف كواكب من النوع الأرضى

قد يكون مثيرًا للملل أن نستعرض هنا كل البعثات الفضائية التـى كُرسـت للكواكب الأرضية. فالسوفييت كرسوا ١٨ بعثة إلى كوكب الزهرة منذ عام ١٩٦١ إلى عام ١٩٨٤؛ حيث نجحوا فى ٨ عمليـات اسـتئناف أداء الهبـوط والتـشغيل لمجسات آلية على سطح هذا الكوكب رغم بيئته المعاكسة بشكل خـاص. وأرسـل الأمريكيون من جانبهم ٥ مجسات لاستكشاف الزهرة بين عـامى ١٩٦٢ و١٩٩٠، وكان آخرها (مجلان Magellan) الذى أنجز تغطية رادارية شبه كاملة للـسطح. ومنذ عام ١٩٦٢ حتى الوقت الراهن باشر ٢٤ مجسًا (١١ مجسًا سـوفييتى و١٣ مجسًا أمريكى) استكشاف المريخ بنجاح متفاوت وبضعة نجاحـات مثيـرة، مثـل عمليتى هبوط مجسان فايكنج لاندرس Viking Landers (١٩٧٦) وهبوط المجس مارس باثفيندر Mars Pathfinder (١٩٩٧) وكان على متنه الروبوت سوجورنور Sojournor. وبلا نزاع فإن أرصاد بعثة فايكنج، والتى استكملت فى وقتنا الـراهن بعثة مارس جلوبال سيرفيور Mars Global Surveyor، هى التى أتاحت الحصول على تصور عام لتاريخ هذا الكوكب. ويعتبر عطارد هـو المحتقـر فـى مجـال الاستكشاف الكوكبى. وقد تم تكريس بعثة أمريكية وحيدة (مـارينر ١٠ Mariner) إليه فى عام ١٩٧٤، وفضلاً عن ذلك لم تكتمل. من هنا فإن هـذا الكوكـب هـو المجهول أكثر من غيره من بين الكواكب الأربعة فى المجموعة الشمسية الداخلية. ولتفادى هذه الثغرة قررت وكالة الفـضاء الأمريكيـة NASA ووكالـة الفـضاء الأوروبية ESA الشروع فى بعثتى ميسينجر Messenger فى عام ٢٠٠٤ (الوكالة الأمريكية) وبيبى كولومبو Bepi - Colombo (الوكالة الأوروبية) فى عام ٢٠٠٩.

وللزهرة التى تعتبر عادة الكوكب "الأخ" للأرض بسبب حجمها، غلاف جوى بالغ الكثافة وغائم يخفى سطحها كله دائمًا (الضغط على التربة = ٩٠ مرة ضغط الغلاف الجوى للأرض، ودرجة الحرارة على التربة = نحو 450° درجة مئوية، تركيب الغلاف الجوى المنخفض = ٩٥ فى المائة ثانى أكسيد الكربون CO_2). وكان علينا أن ننتظر صور رادار بعثتا الاتحاد السوفييتى فينيرا ١٥ و١٦ Venera (١٩٨٣) والبعثة الأمريكية ماجلان (١٩٩٠) لاكتشاف أن أكثر من ٧٥ فى المائة من السطح مغطى بسهول بركانية جديدة نسبيًا، تنتشر فيه حفر قليلة، ويتناثر عليه الكثير جدًا من التكوينات البركانية ومشقق بواسطة تصدعات ذات أحجام ضخمة. ويحتل بقية السطح هضبتان مرتفعتان كل منهما ذو حجم يضارع أحجام القارات الأرضية، مثل إفريقيا وإستراليا. وتبدو هاتان الهضبتان كما لو أنهما نتجتا عن تحركات تكتونية[11] ذات شأن. وبعد تكوين هذا الكوكب منذ نحو ٤,٥ مليار سنة ربما يكون قد تعرض لقصف نيزكى شديد. لكن آثار هذا القصف لم تعد مرئية فى وقتنا الراهن؛ لأن الظواهر الجيولوجية مثل الظواهر البركانية، أدت إلى اختفائها و"جددت" سطح الزهرة. وبعكس الأرض يبدو أن الأنشطة الجيولوجية على الزهرة (البركانية والتكتونية) قد توقفت منذ نحو ٦٠٠ مليون سنة قبل عصرنا الحالى، ومنذ ذلك العصر لم يتعرض سطح الزهرة لتغييرات ضخمة. وقد تكون معرفة أسباب هذه الاختلافات التطورية (التركيب، والبنية الداخلية) مفيدة جدًا، وبشكل خاص من أجل فهم نواحٍ محددة من تاريخ كوكبنا نفسه. ومن أجل ذلك، يجب أن يكون فى استطاعتنا إحضار عينات إلى الأرض من الصخور من أجل تحليلها وتأريخها، وتحقيق مقاييس لعلم الطبيعيات الأرضية فى موضعها الأصلى in situ. وقد تكون هذه العمليات قابلة للتفكير، لكن من الصعب تحقيقها بسبب بيئة كوكب الزهرة؛ لذلك لم يتم التفكير فى أى بعثة فضائية جديدة موجهة إلى كوكب الزهرة فى المستقبل القريب، وتكرس وكالات الفضاء الأمريكية

(١١)تكتونية أو بنيوية tectonique: خاصة ب أو مسبب ل أو ناتج عن التشويه البنائى للقشرة الأرضية (علم الأرض). (المترجم)

NASA والأوروبية (ESN, CNES وخلافها) والوكالة اليابانية ISAS جزء كبير من جهودها وإمكانياتها إلى كوكب المريخ.

والمريخ أصغر مرتين من الأرض وله غلاف جوى هزيل جدًا من ثانى أكسيد الكربون CO_2 (الضغط = ٦,١ مللى بار). وعلى سطحه حفر ناتجة عن عدم تماثل تشكلى بين نصف الكرة الجنوبى الذى كونته أراضى قديمة مغربلة بكثير من الحفر النيزكية، ونصف الكرة الشمالى الذى تحتله سهول ملساء نسبيًا، أقل حفرًا ومن ثُم أكثر شبابًا. وتقع هذه السهول إلى أسفل الأراضى الأقدم فى نصف الكرة الجنوبى. ومن جانب آخر فإن السطح المريخى يظهر تشابها مع كوكبنا: البراكين، وقنوات، وشبكات نهرية، وحقول كثبانية، وانزلاقات أرضية..إلخ. لكن هذه التضاريس ذات أبعاد هائلة بوجه عام. كذلك فإن قمة بركان أوليمبس مونس Olympus Mors ترتفع إلى ٢٧ كم وقطره ٦٠٠ كم عند القاعدة. وبالمثل فإن القناة الاستوائية فاليس مارينيريس Valles Marineris تمتد إلى مسافة ٥٠٠٠ كم وتتألف من أودية يمكن أن يصل عمقها إلى ٦ كم وطولها ١٥٠ كم ومنحدراتها مشجوجة بعمق بواسطة التآكل. كيف يحدث هذا التآكل؟ لا شك أن الجاذبية مسؤولة عن الانزلاقات الأرضية التى تُلاحظ فى انحدارات القنوات، لكن ربما أن الماء فى حالته السائلة قد لعب دورًا رئيسيًا فى تآكل السطح المريخى. وفى الواقع يمكن أن نلاحظ هناك شبكات نهرية ذات شأن تمثل تشابهًا كبيرًا مع الأنهار الأرضية (شبكات تسلسلية مع كثير من الروافد وملتقيات الأنهار، وتعرجات نهرية وجزر بالغة الصغر..إلخ). وتقع هذه الشبكات، وهى جافة حاليًا، فى نصف الكرة الجنوبى وتجرى نحو نصف الكرة الشمالى؛ حيث كانت تصب فى "محيط" قليل العمق (نحو ٦٠٠ متر). لكن الماء اختفى تمامًا من فوق سطح المريخ، ربما يعود ذلك إلى تغيرات مناخية مهمة وإلى انخفاض ضغط غلافه الجوى: قد لا يتيح الضغط الجوى الطفيف المعاصر (٦,١ ميللى بار) للماء بالوجود فى حالة سائلة. لكن قد لا يكون الماء قد اختفى تمامًا من كوكب المريخ. وتدعو بعض دلائل التشكل، التى تشبه تلك التى يتم ملاحظتها فى مناطق التخوم

الجليدية الأرضية، إلى تصور أنه من الممكن أيضًا أنه مازال موجودًا بشكل دائم تحت التربة المريخية على هيئة جليد أو على هيئة تربة متجلدة، "تربة متجمدة"[١٢] فى "الجمد السرمدى". وتمثل مسألة وجود الماء على المريخ أحد الألغاز الضخمة فيما يتعلق بهذا الكوكب، ليس فقط ما يخص فهم تطوره، ولكن أيضًا لأنه قد يسمح بوجود شكل من "الحياة". ومن بين الأهداف الأخرى للاستكشاف المستقبلى لهذا الكوكب تحديد ما إذا كان ومازال يوجد ماء تحت التربة، وأسباب اختفائه من السطح وإلى متى يعود هذا الاختفاء. وتدعو كل الاكتشافات الأخيرة لمساح المريخ الشامل Mars Global Surveyor إلى التفكير فى أن هذا الاختفاء ربما وقع فى وقت حديث نسبيًا، مما يجعل التاريخ المناخى للكوكب وراء ما حدث.

وفى مجرى هذا العقد، يحاول الكثير من المجسات الفضائية الإجابة من الأسئلة العديدة التى يلقيها العلماء فيما يخص المريخ. وستطلق وكالة الفضاء الأمريكية فى عام ٢٠٠١ مجسًا مداريًا (أوديسة المريخ ٢٠٠١ Mars Odyssey) لرسم خرائط تفصيلية للسطح، وفى عام ٢٠٠٣ جهازى روبوت متحرك موجهين لاستكشاف السطح وتحليل مكوناته. وستكون هاتان البعثتان تمهيدًا لمشاريع أكثر طموحًا تهدف إلى إحضار عينات إلى الأرض من الكوكب الأحمر لتحليل مكوناتها، وقياس أعمارها والبحث عن آثار لنشاط عضوى محتمل. ومن جانبها ستطلق وكالة الفضاء الأوروبية فى عام ٢٠٠٣ المجس المدارى مارس أكسبريس Mars Express، والذى لن يكتفى بأن يكون هدفه رسم خرائط للسطح فقط ولكن أيضًا رصد وجود "تربة متجمدة"، والذى سيكون مجهزًا بمركز قياسات خاصة بعلم الطبيعيات الأرضية على السطح (بيجل ٢ Beagle ٢). وسوف يوضع المجس اليابانى نوزومى Nozomi على المدار المريخى فى عام ٢٠٠٣ لدراسة الغلاف الجوى للكوكب. وكذلك ستبصر النور مشروعات أخرى، مثل تلك البعثة الفرنسية

---

(١٢) تربة متجمدة pergelisol لا ينفذ فيها الماء، فى الجمد السرمدى permafrost: والجمد السرمدى طبقة متجلدة باستمرار على عمق متفاوت على سطح الأرض فى المناطق القطبية المتجمدة. (المترجم)

الأوروبية نيتلاندر Netlander التى ستتكون من وضع شبكة مراكز طبيعيات أرضية على سطح المريخ لكى تدرس بشكل خاص بنيته الداخلية.

استكشاف الكواكب الخارجية

يعتبر استكشاف كواكب المجموعة الشمسية الخارجية (المشترى، وزحل، وأورانوس، ونبتون، وبلوتو) مشروع طويل الأمد بسبب المسافات التى يجب أن تقطعها المجسات الفضائية. فبعثة كاسينى هوجينس Cassini Huygens (للوكالتين الأمريكية والأوروبية)، مثلاً التى أطلقت من كاب كانافيرال Cape Canaveral فى عام ١٩٩٧ فى اتجاه زحل لن تصل إلى هذا الكوكب إلا فى عام ٢٠٠٤ بعد أن تكون قد قطعت ٣,٥ مليار كيلومتر! وفى الواقع يجب على مسارات المجسات الفضائية التى تُطلق فى اتجاه الكواكب الخارجية أن تضع فى اعتبارها قوانين الميكانيكا السماوية، وبالتالى المواقع النسبية للأرض والكواكب التى تقصدها حتى تقلل من مدة مرحلة التجوال. لكن ذلك لا يكفى ويجب أن تتسارع المجسات بجعلها تمر مرة أو عدة مرات بالقرب من الكواكب طيران محاذاة[١٣] مثل الأرض أو الزهرة لكى تنتفع من مساعداتها الناتجة عن الجاذبية. وهذه المسارات تطيل كثيرًا المسافات المقطوعة، لكنها تختصر بشكل ملحوظ مدة الرحلة. فبعثة جاليليو (ناسا)، مثلاً، التى انطلقت فى أكتوبر عام ١٩٨٩ لتصل إلى المشترى فى ديسمبر عام ١٩٩٥ أجرت تحليقًا فوق الزهرة فى فبراير ١٩٩٠ (زيادة السرعة = ٢ كم /ثانية) وحلقت مرتين حول الأرض فى ديسمبر ١٩٩٠ (زيادة السرعة = ٥,٢ كم / ثانية) وفى ديسمبر ١٩٩٢ (زيادة السرعة = ٣,٧ كم / ثانية).

وحتى إطلاق بعثة كاسينى هوجينس (الوكالتان الأمريكية والأوروبية) فى عام ١٩٩٧، لم يكن استكشاف الكواكب الخارجية قد تحقق إلا عن طريق البعثات الأمريكية (بيونير ١٠ و١١ Pioneer– اللتين أطلقتا فى ١٩٧٣ – وفوياجير ١

---

(١٣)طيران محاذاة flyby: طيران منخفض فوق هدف معين سبقيًا. (المترجم)

و ٢ Voyager- أُطلقتا فى عام ١٩٧٧- وجاليليو - أطلقــت فـــى عـــام ١٩٨٩) والتى شارك فيها باحثون أو تجهيزات علمية أوروبيـــة. وكـــان ضـــمن وظـــائف المجسان بيونير ١٠ و ١١ دراسة وسط ما بين الكواكب وبيئـــة (خاصـــة الغـــلاف الأرضى المشحون)[١٤] الكوكبين المشترى وزحـــل، قبـــل التوجـــه نحـــو تخـــوم المجموعة الشمسية. وكان هذا البرنـــامج يمثـــل مرحلـــة التعـــرف التـــى تـــسبق الاستكشاف الأكثر انتظامًا لتلك الكواكب بواسطة المجسين فويـــاجير ١ و ٢ وفـــى وقت لاحق المجسين جاليليو (المشترى) وكاسينى هوجينس (زحل وقمره تيتـــان). وكان من المتوقع لرحلة فوياجير فى البداية دراسة الكوكبين المـــشترى وزحـــل وأقمارهما لتحلق فوقهما على التتالى فى عام ١٩٧٩ وفى عامى ١٩٨٠ - ١٩٨١، وتمت إطالتها ٨ سنوات لكى تتيح للمجس فويـــاجير ٢ أن ينطلـــق محلقـــا فـــوق الكوكبين أورانوس (١٩٨٦) ونبتون (١٩٨٩). وتصور هذه البعثـــة بـــشكل جيـــد استخدام الجاذبية المساعدة لتبديل مسار مجس فضائى والإسراع بـــه. وبـــذلك تـــم الإقلال من طيران فوياجير ٢ نحو نبتون من ٣٠ إلى ١٢ سنة.

وبعكس بعثتى بيونير وفوياجير اللتين لم تفعلا سوى التحليق بسرعة فـــوق الكوكبين المشترى وزحل، كانت كل بعثة من البعثتين جاليليو وكاسينى هـــوجينس مكرسة لأحد هذين الكوكبين العملاقين. وتم وضع جـــاليليو علـــى مـــدار حـــول المشترى فى عام ١٩٩٥وأرسل مجسًا صغيرًا فى غلافه الجوى العلـــوى لدراســـة تركيبه وديناميكيته. واشتغل المجس الصغير خلال ٥٩ دقيقة (أى ما يناظر الهبوط ٢٠٠ كم) قبل أن يتحطم. وكانت بقية الرحلة، التى انتهت عمليًا، مكرسة لدراســـة الكوكب وأقماره الأربعة الجاليلية[١٥] الضخمة: يو Io، وأوروبا Europe وكاليستو Callisto وجانيميد Ganymede. ولن يتم وضع المجس الأمريكى على مدار حول

---

(١٤)الغلاف المشحون المحيط بالأرض magnetosphere: يمتد من مائة إلى عدة آلاف من الكيلـــومترات فوق السطح، حيث يتحكم المجال المغناطيسى الأرضى فى الجسيمات المشحونة. (المترجم)

(١٥)الجاليلية galileens: نسبة إلى جاليليو. وقد تم اكتشاف ١٥ تابعًا تدور حول المشترى، وكان اكتـــشاف ألمع أربعة منها على يد جاليليو عام ١٦١٠. (المترجم)

زحل إلا فى عام ٢٠٠٤، ويحمل على متنه المجس الأوروبى الصغير هــوجينس Huygens، الذى سيهبط فى الغلاف الجوى لتيتــان، أكبــر أقمــار زحــل وكــل المجموعة الشمسية. وبفضل المقاييس التى تُجرى على كل امتداد هبوط هــوجينس نحو سطح تيتان، يأمل العلماء فى كشف أسرار غلافه الجوى، مــوطن العمليــات الكيميائية الضوئية photochimiques التى قد تشبه تلك التى سبقت ظهور الحيــاة على الأرض.

وأظهرت بعثات بيونير وفوياجير وجاليليو أو لكشفت عن الخواص المدهشة للأغلفة الجوية والأغلفة المشحونة، والحلقات والكثير من أقمار الكواكب العملاقة. ويعتبر المشترى وزحل وأورانوس ونبتون من الكواكب الغازية التى تتكون بشكل أساسى من الهيدروجين والهليوم، مع كميات طفيفة من الميثان والنــشادر وبخــار الماء، ونواة صخرية وجليد. وغلاف تلك الكواكب مضطرب جدًا، محتد بــدوران بالغ السرعة تنتج عنه أعاصير عملاقة مثل البقعة الحمراء الــضخمة للمــشترى، المعروفة جيدًا لدى علماء الفلك، أو البقعة الزرقاء الضخمة لنبتون، التى اكتــشفها فوياجير ٢. واكتشفت بعثة جاليليو أن المشترى يشهد نشاطًا مؤثرًا كثير العواصف بسبب الدوران الرأسى للبخار فى الطبقات الغائمة فوق الغلاف الجوى.

ولهذه الكواكب العملاقة جميعًا حلقات. وتلك الخاصة بزحل كانت معروفــة منذ وقت طويل، لكن المجسات الفضائية لم تسمح فقط بدراسة بنيتها "عن قــرب"، لكنها اكتشفت أيضًا أو أكدت وجود حلقات للمشترى، وأورانوس ونبتــون؛ حيــث بعضها غير مرئى أو يصعب رصده من الأرض. كذلك فإن للمشترى حلقة بالغــة الرقة تمتد حتى ١٢٩٠٠٠ كم من مركز الكوكب. وقد تكون تلك الحلقة متكونة من حبيبات رقيقة جدًا ناتجة عن سطح الأقمار الأكثر قربًــا، منتزعــة تحــت تــأثير تصادمات النيازك. ومن المحتمل أن لحلقات زحل، التى تمتد إلى نحــو ٣٠٠٠٠٠ كم، الأصل نفسه، لكن العناصر التى تتكون منها أكثر غلظة. وتكونــت الحلقــات الأكثر بعدًا عن مركز الكوكب تحت تأثير الجاذبية المستحثة بأقمار صــغيرة تقــع على مقربة. وهذه الخاصية تم رصدها أيضًا على مستوى حلقات أورانوس.

ولكل من تلك الكواكب مجال مغناطيسي قوى جدًا. فمجال المشترى، مثلاً، قد يكون أشد ألفى مرة من مجال الأرض، وكثافة الرياح الشمسية أقل خمس وعشرين مرة بسبب المسافة التى تفصل الكوكب العملاق عن الشمس، والغلاف المشحون للمشترى يمتد أبعد مائة مرة من الغلاف المشحون للأرض. والاختلاف الآخر المهم بين هذين الغلافين المشحونين هو وجود مصدر "محلى" من الجسيمات المشحونة الآتية من القمر يو وحلقته من البلازما. ويقذف النشاط البركانى لهذا القمر فى غلافه الجوى كمية ضخمة من الغاز والغبار التى تأينت نتيجة الأشعة فوق البنفسجية الآتية من الشمس، ثم انطلقت ثانية لتكوين حلقة هائلة من البلازما تحيط بكل المشترى على مستوى مدار يو. والمجال المغناطيسى لزحل من النوع ثنائى الاستقطاب وعزمه أكبر ٥٥٠ مرة من عزم ثنائية قطب الأرض، لكنه أصغر ١٠ مرات من نظيره لثنائية قطب المشترى. وكما هو الحال بالنسبة للمشترى، فإن المجال ثنائى الاستقطاب لزحل يتشوه تحت تأثير الرياح الشمسية، مضغوطًا فى اتجاه الشمس وممتدًا على هيئة ذيل طويل فى الاتجاه العكسى. ولأورانوس أيضًا الذى تأرجح محور دورانه دون شك بسبب اصطدام بكوكب آخر، مجال مغناطيسى يضارع فى شدته نظيره الأرضى. لكن المحور المغناطيسى يميل نحو ٦٠° بالنسبة لمحور دوران الكوكب، وذيل الغلاف المشحون مشوه بشدة بواسطة دورانه. وعلى غرار محور أورانوس فإن محور المجال المغناطيسى لنبتون مائل بشدة (٤٧°) ومزاح بالنسبة لمركز الكوكب.

ومنذ وقت بعيد أتاحت الأرصاد الأرضية اكتشاف أن الكواكب العملاقة لها أقمار، وحتى نقدم مجرد أمثلة قليلة، رصد جاليليو، فى عام ١٦١٠، الأقمار الأربعة الكبيرة للمشترى (يو، أوروبا، جانيميد، وكاليستو)، وفى عام ١٦٥٥ اكتشف كريستيان هوجينس Christiaan Huygens تيتان، أكبر أقمار زحل وأكبر أقمار المجموعة الشمسية، وفى عام ١٧٨٧، رصد وليام هيرشيل William Herscel أكبر قمرين لأورانوس (تيتانيا Titania وأوبرون Oberon)، وتبع ذلك فى عام ١٨٥١ بواسطة وليام لاسيل William Lassel (أرييل Ariel وأمبرييل

Umbriel) وبواسطة جيرارد كويبر Gerard Kuiper فى عـام ١٩٤٨ (ميرانـدا Miranda). واليوم بفضل الأرصاد الحديثة وخاصة اكتشافات بعثة فوياجير، فـإن قائمة توابع الكواكب العملاقة طالت كثيرًا. وفى الوقت الراهن فإن للمـشترى ٢٨ تابعًا (منها ١٢ اكتشفها فوياجير ٢)، ولزحل ١٨ (أكثر من ١٢ اكتشفها فوياجير ٢ لكنها غير مؤكدة)، ولأورانوس ٣١ (منها ٩ اكتشفها فوياجير ٢) ونبتون ٨ (منهـا ٦ اكتشفها فوياجير ٢). والتوابع التى تم اكتشافها ذات أحجـام صـغيرة (نـصف القطر بين ١٣ و٧٧ كم لتوابع أورانوس) مما يوضح أنه لم يكـن مـن الممكـن رصدها من الأرض، وقد يكون لبعض منهـا، مثـل أماليتيـا Amalthee (تـابع المشترى)، تركيبًا يشبه نظيره فى الكويكبات، ولكن بالنسبة لأغلبها، تتكون توابـع الكواكب العملاقة من جليد وربما مع نواة صخرية، ومع ذلك هناك استثناء هو يو. ويبدو أن هذا التابع يتكون من صخور صوانية، وسطحه مغطـى بمـادة بركانيـة مصهورة غنية بالكبريت الناتج عن الانفجارات. وكان رصد الكثير من الانفجارات البركانية التى بلغ ارتفاعها من ٢٥٠ إلى ٣٠٠ كم أحد الاكتشافات الأكثـر إثـارة لبعثة فوياجير. وأثبتت بعثة جاليليو أن يو كان دون شك أحد الأجرام الأكثر نشاطًا من الناحية الجيولوجية فى المجموعة الشمسية. وقد يكون هذا النشاط أصل تـشكّل هذا التابع (تحت تأثير المد والجزر) الذى استحثته التفاعلات بـين يـو وأوروبـا وجانيميد والمشترى. وتحتفظ الكواكب الجليدية أيـضًا بـالكثير مـن المفاجـآت. فبعضها، مثل كاليستو، يمثل أسطحًا "قديمة" نقشت فيها الحفـر مـن التـصادمات بالنيازك. وأخرى بالعكس، مثل أوروبا أو جانيميد، يظهر عليها سطح "جديد" نسبيًا تشقه تصدعات معزولة عن رقعة "طاقية جليدية banquise" كانت تتزحزح بالنسبة لبعضها البعض، ربما على سطح محيط من الماء المالح. ودفعت هـذه الفرضـية الأخيرة ناسا إلى دراسة احتمال إرسال بعثة مكرسة بشكل خاص لدراسـة التـابع أوروبا (بعثة استكشاف محيط أوروبا Eurooa Ocean Explorer) وبشكل أكثـر خصوصية دراسة بنيته الداخلية. وربما تنطلق هذه البعثة فى عـام ٢٠٠٤ لتـصل إلى مجموعة المشترى فى عام ٢٠٠٧.

ما مصير المجسين بيونير وفوياجير؟ بعد أن يكونـــا قـــد حققـــا أهـــدافهما، يتوجهان إلى "الخروج" من المجموعة الشمسية؛ أى إلى حد توقف التأثير الشمـــسى heliopause الذى بعده لا يصبح تأثير المجال المغناطيـــسى والريـــاح الشمـــسية ملموسًا. ولقد تجاوز المجس بيونير ١٠ هذا الحد فى ٣١ أبريل ١٩٩٧، وعاد إلى كوكبة برج الثور Taureau مع مواصلة نقل معلومات. وبـــالعكس فـــإن المجـــس بايونير ١١ توقف عن العمل فى ٣٠ سبتمبر ١٩٩٥، لكنه واصـــل التوجـــه إلـــى كوكبة العقاب L`aigle. ولم يَخرج المجسان فوياجير بعد ذلـــك مـــن المجموعـــة الشمسية، وعلى ذلك لم يبتعدا عن الأرض إلا بمسافة ١٢ مليار كم (فويـــاجير ١) و٩,٣ مليار كم (فوياجير ٢) حيث يبتعدان بسرعة ٤٣ كم / ثانية مع مواصلة بـــث الكثير من المعلومات عن بيئة ما بين الكواكب، ويرى مهندســـو ناســـا أن هـــذين المجسين يجب أن يواصلا عملهما على الأقل حتى عام ٢٠٢٠.

وبلوتو هو الكوكب الخارجى الوحيد الذى لم تتم زيارته بعد، بسبب ابتعـــاده وموقعه المدارى عند بعثة فوياجير. ولهذا السبب تدرس ناســـا مـــشروعًا (بلوتـــو كويبر إكسبريس Pluto - Kuiper Express) مخصص لسد هذه الفجوة. وقد يـــتم إطلاق هذه البعثة فى عام ٢٠٠٤ لتصل إلى بلوتو فـــى ٢٠١٠ أو ٢٠١٦. وفـــى الخطة المالية، فإن هذا المشروع يعتبر منافسًا لمشروع استكشاف محـــيط أوروبـــا وهو مشروع مجس شمسى، وعلى ناسا فى هذا الحالة أن تختـــار. مـــاذا ســـيكون اختيارها، يجب أن يكون عام ٢٠٠٤ عام سعد بالنـــسبة لاستكـــشاف المجموعـــة الشمسية مع وصول البعثة كاســـينى هـــويجينس (الوكالـــة الأمريكيـــة والوكالـــة الأوروبية" حول زحل.

خاتمة

الخلاصة أنه خلال العقد القادم سيكون استكشاف الكواكب غنى بالأحداث التى سيكون لأوروبا، وفرنسا بشكل خاص، دورًا نشطًا فيها:

- استكشاف قمرى بواسطة المجس الأوروبى سمارت ١ SMART (٢٠٠٢) والمجسان اليابانيان لونار أ Lunar - A (٢٠٠٣) وسيلين Selene (٢٠٠٥).
- استكشاف كوكب المريخ بواسطة المجسين الأمريكيين أوديسا المريخ (١٥٤) Mars Odyssey (٢٠٠١) وماسح المريخ Mars Surveyor (٢٠٠٣)، والمجس الأوروبى إكسبريس المريخ Mars Express (٢٠٠٣) والمجس اليابانى نوزومى Nozomi (٢٠٠٣).
- استكشاف عطارد بواسطة المجس الأمريكى ميسنجر Messenger (٢٠٠٤) والمجس الأوروبى بيبى - كولومبو Bebi - Colombo (٢٠٠٩).
- استكشاف زحل وتابعه تيتان بواسطة المجس الأمريكى الأوروبى كاسينى هوجينس Cassini - Huygens (٢٠٠٤). ولا شك أن كل هذه البعثات سيكون لها حصتها من الاكتشافات المدهشة التى ستتيح للمجتمع العلمى الدولى التقدم فى مجال معرفة مجموعتنا الشمسية.

تنوع ومواصفات العوالم الكوكبية: بماذا ينبئنا المريخ، والقمر، والمذنبات والكويكبات ؟[16]

بقلم: جين-بيير بيبرينج
Jean - Pierre BIBRING

ترجمة: عزت عامر

لقد غيرت سنوات الاستكشاف الفضائى الأربعون بشكل عميق تصوراتنا عن عالم الكواكب، وبالأخص تصورنا عن الأرض: والمثير هو تنوعها غير العادى، وهو الموضوع الرئيسى فى علم الكواكب المعاصر وما يتعلق بها[17] الذى يطمح إلى تعيين وفهم مواصفات الكواكب، التى جعلتها، على الأقل بالنسبة للأرض، تحتوى على الأحوال المناسبة لظهور وتطوّر الكائن الحى. ومن أين أتت سوى من أجرام، نعرف عنها فى الوقت الراهن أنها تشكلت تقريبًا فى وقت واحد (منذ ما يزيد عن ٤,٥ مليار سنة)، ومن المادة نفسها، وفى المكان نفسه من مجرتنا، وتطورت بكل هذه الطرائق المختلفة؟

محركات الآلات الكوكبية

نحن بعيدون كثيرًا عن الإحاطة بطبيعة محركات النشاط الكوكبى: لدى الكواكب مصادر طاقة داخلية متعددة، تسلك بشكل مختلف مع الزمن، وتفرض أطوار وإيقاع التطور. وبعكس الفكرة الشائعة لا ينشأ تطور الكواكب فقط من واقعة أنها موجودة على مدارات حول الشمس، وتتلقى الطاقة منها. وبالطبع تعتبر

---

(١٦)نص المحاضرة رقم ١٩١ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٩ يوليو ٢٠٠٠.

(١٧)علم الكواكب وما يتعلق بها planetologie: فرع من علم الفضاء الذى يبحث أو يتعلق بالكواكب والأقمار الصناعية والظواهر الجوية للمجموعة الشمسية. (المترجم)

الطاقة الشمسية أساسية في المحافظة على النشاط الجوى، وخاصة الغلاف الحيوى[١٨] الأرضى، غير أنه يتم امتصاص الكثير من هذه الطاقة عند السطح، ولا تُحسب في الميزانية الطاقية للجوف الكوكبى. والنشاط الإشعاعى للعناصر (خاصة اليورانيوم، والثوريوم والبوتاسيوم) الموجودة فى باطن الأرض وفى أغلب الأجرام الكوكبية الأخرى الصلبة هو الذى يحدد صيرورتها.

ولهذه العناصر خاصية الانشطار التلقائى (بشكل طبيعى) بعد فترات زمنية تُقاس بمليارات السنوات: وحيث إن هذا عمر مجموعتنا الشمسية، فإن هذه العناصر هى التى تساهم أكثر من غيرها فى إنتاج الطاقة الداخلية. إلا أن هذه العناصر قليلة الغزارة جدًا: و"أجهزة التدفئة radiateurs" ذات النشاط الإشعاعى هذه لها فعالية تافهة، كل متر مكعب من المادة الكوكبية لا يبدد سوى نحو ١٠ $^{-٧}$ وات فى المتوسط، واحتاج الأمر إلى مئات الملايين من السنوات حتى تسخن الكواكب من الداخل لكى تصل إلى درجات حرارتها القصوى، ومن ثم مستوى نشاطها الأكثر ارتفاعًا. ومع ذلك خلال اضمحلال هذه العناصر، بواسطة النشاط الإشعاعى، فإنها تحرر طاقة، وتوقف إنتاج الطاقة بمرور الوقت على هذه المصادر نفسها: بعد أن تصل إلى أقصى طور لنشاطها، وتبرد الكواكب بالتدريج؛ لكى تصل فى النهاية إلى "الموت الجيولوجى mort geologique".

ولا يخمد كل شىء فى الوقت نفسه: فالموت الجيولوجى يحدث كذلك فى وقت أبكر، خلال تطور الأجرام الكوكبية، حتى تصبح ذات أحجام صغيرة، ولكى نضع ذلك فى حسباننا، مع التبسيط إلى أقصى حد، فلنفترض أن كل شىء كان مصنوعًا من المادة نفسها، موزعة بطريقة متجانسة: متر مكعب من كويكب، من القمر أو من المريخ أو من الأرض، تحتوى فى هذه الحالة على تركيز العناصر المشعة نفسه؛ لذلك فإن الأحجام نفسها تحتوى على أجهزة تدفئة متكافئة، والإنتاج الكلى للطاقة فى جرم ما يكون متناسبًا بشكل مباشرة مع الحجم الكلى. ولكن حيث

(١٨) الغلاف الحيوى biosphere: الجزء الذى تشغله الأحياء من سطح الأرض. (المترجم)

إن درجة الحرارة التى تصل إليها قطعة ما تنتج عن التوازن بين التدفئة والخسائر، فإن ميزانية الطاقة لكوكب ما هى توازن بين هذه المساهمة ذات الأصل الإشعاعى والخسائر، التى تحدث عن طريق إشعاع السطح، والتى تتناسب بالتالى مع مربع نصف القطر R. ومع المكاسب فى R^3 (الحجم) والخسائر فى R^2 (السطح)، يعتمد التوازن على R: كلما زاد نصف القطر تفوقت المكاسب على الخسائر، وزاد ارتفاع درجة الحرارة التى يتم الوصول إليها. وفى المقابل، فإن الأجسام الأصغر يمكن أن تشع الطاقة المحررة بشكل أكثر فعالية، وتظل باردة. وهكذا فإن النشاط الإشعاعى قام بتسخين الأجرام الكوكبية المختلفة حتى مستويات تعتمد على أحجامها، ثم بردت بعد ذلك بالتدريج لكى تخمد بالأحرى فى وقت مبكر حتى أن الأجرام الأصغر لم تصل إلى مستويات بالغة الارتفاع.

ما تنبئنا به الأجرام المختلفة

وهذا هو السبب فى أن الأجرام الأصغر فى المجموعة الشمسية، تلك الأجرام ذات الأبعاد الضئيلة جدًا (أقل من عشرات الكيلومترات)، التى لم تعرف أبدًا واقعة السخونة الداخلية الشاملة انطمست فيها الخواص المكتسبة خلال تكوينها. وحافظت عليها حتى وقتنا الراهن، وتتضمن ما يعتبر "حفريات fossiles". وبتحليل هذه الأجرام "البدائية" قد يكون ذلك مدخلاً إلى الأحوال الأولية لتطور المجموعة الشمسية، وهو ما سوف نتحدث عنه فيما يلى.

ومن خمسة أجرام للمجموعة الشمسية، ذات أحجام وتاريخ متماثل، أصاب الموت الجيولوجى الأجرام الأصغر أولاً: كان القمر أول ما خمد، ثم تبعه عطارد، ثم المريخ. ولا نعرف فى الوقت الحالى ما إذا كان كوكب الزهرة مازال نشطًا أم لا، والأرض نفسها تتعرض دائمًا لحركات داخلية ينتج عنها الهزات الأرضية، مما يؤدى إلى نشوء الجبال والنشاط البركانى الشديد. وإذا كان من الممكن حدوث كوارث محلية على الأرض، فإن هذا النشاط يكون مع ذلك ضروريًا على المستوى

العام بالنسبة للحياة: فبفضل النشاط البركاني يتجدد الغلاف الجوى، وبمساهمة الطاقة الشمسية، ظل ملائمًا للكائنات الحية بالطريقة التى نعرفها. ولو حدث أن توقفت حركات انتقال الحرارة الداخلية، بانخفاض النشاط الإشعاعى، لزال تجديد الغلاف الجوى لصالح آليات الاحتباس، ولزالت بسببه الشروط المناسبة للمحافظة على غلاف حيوى، ويمكن أن نتوقع ما قد يحدث قبل أن تتوقف الشمس عن التوهج: قد تختفى الحياة على الأرض والشمس ساطعة.

ونظرًا لأهمية النشاط الجيولوجى للأرض، فإنه أخفى بالكامل فعلاً المراحل السابقة: فمن الصعب تمامًا العثور على آثار أحداث شهدها تاريخه، ومن ثم تحديد أصل تلك المواصفات. وهو ما تتيحه لنا الأجرام الأصغر أكثر.

ويعلّمنا رصد القمر أساس فى ما حدث فى المجموعة الشمسية الداخلية قبل قليل من تكوين الكواكب. لقد تشكّلت كمية من الأجرام بعدد كبير أكثر بكثير من تلك الكواكب والأقمار التى نعرفها. غير أنها، كما لو كانت مداراتها قد اصطدمت بعنف ببعضها البعض، تحطمت بالتبادل واختفت عند هذه التصادمات: وهذا ما نلاحظه على هيئة حفر بكل الأحجام، بعضها كبير يقرب من مئات، بل آلاف الكيلومترات، والأغلبية أكثر صغرًا. واحتاج الأمر إلى مئات الملايين من السنوات حتى تتم بذلك "تنقية" المجموعة الشمسية، وحتى لا يبقى إلا الأجرام التى نعرفها فى الوقت الراهن. وأصابت هذه التصادمات كل الأجرام معًا: وقد تعطى صورة فوتوغرافية للأرض منذ ٤ مليارات سنة صورة لجرم منقّش بحفر التصادمات، مشابه لما عليه القمر: تكون بأحجام صغيرة، تلك التى لم تتعرض؛ لأن "تصبح منعدمة" فى مجملها، كما كانت حالة الأرض، وتظهر عليها دائما آثار القصف البدائى الشديد. ويمكن أن نميز فيها أيضًا تشكيلات معتمة، يطلق عليها (خطأ) "بحارًا". وهى ناتجة مباشرة عن نشاط داخلى فى القمر: بمجرد أن تكونت فى أغواره كتلة منصهرة ذات لزوجة كافية وتحركت، وصعدت إلى السطح (بالحمل)، وظهرت فى الأراضى التى يسهل الوصول إليها: وملأت حفر التصادمات الأكثر

عمقًا. وبمجرد أن تجمدت هذه الطبقة البزلتية المنصهرة، علـــى الـــسطح، التـــى تحتوى على المزيد من سيليكات[١٩] منجنيزية حديدية كثيفة (وهـــى توجـــد أكثـــر إعتامًا)، أدت إلى ظهور البحار، فى تباين مع الهضاب المحيطة الفاتحة. وتكونـــت هذه البحار ما بين ٤ و٣,٣ مليار سنة بالنسبة لعصرنا الراهن، أى بعـــد القـــصف الأولى، ولعلها احتوت على ما كان يمثل إلى حد ما حفر التصادمات. وأتاح تحليل العينات القمرية وسطح القمر إعادة تصور تاريخ المليار سنة الأولـــى للمجموعـــة الشمسية.

وهكذا يتيح لنا معدل حدوث الحفر على القمر تقدير عدد التصادمات التـــى تلقتها الأرض: من المحتمل أن بضع عشرات من الـــصدمات الـــضخمة كونـــت أحواضًا قطر كل منها عدة آلاف من الكيلومترات، ولعله كان هناك عدة آلاف من الحفر أكبر من من نحو مائة كيلومتر. ولم ندرك بعد حجم مجمل نتائج مثل هـــذه الأحداث على التاريخ اللاحق للأرض، وعلى تحركاتها المدارية.

ولدينا منها واحدة على الأقل جديرة بالذكر: يُـــرجح أن يكـــون أحـــد هـــذه التصادمات الجبارة، مع جرم بحجم جرم المريخ، وراء تكوّن القمر. ولعل نـــواتج الحطام، التى تم قذفها ووضعها فى مدار حول الأرض، قد تجمعـــت مـــن جديـــد لتكوين القمر، وهو ما قد يفسر مجمل الخواص التى نعرفها عنه، منها حقيقـــة أن تركيبه يشبه تركيب الطبقات الخارجية (الكساء والقشرة، باستثناء النواة) لـــلأرض. ومن مواصفات القمر، بصفته تابعًا للأرض، أن كتلته يمكن مقارنتها بكتلتها: يمكن تقريبًا الحديث عن مجموعة أرض / قمر كمجموعة مزدوجة. وهذه حالة فريدة فى المجموعة الشمسية: ولفوبوس Phobos ودايموس Deimos الدائرين حول المريخ، وهما مثل توابع الكواكب العملاقة تمامًا، كتلتين أقل بكثير من كتل الكواكب التـــى تتجذب إليها هذه التوابع. ومن المحتمل أن القمر، فى المقابل، كـــان لـــه تـــأثيرات

---

(١٩)سيليكات silicate: ملح يحصل من امتزاج الحامض الصوانى بإحدى القواعد مثل البوتاس والكلـــس. (المترجم)

جاذبة أساسية على بعض الخواص المدارية للأرض، وعلى وجه الخصوص على ما يتعلق بالميلان obliquite: تدور الأرض حول نفسها حول محور يميل ٢٣° بالنسبة للخط العمودى على مستوى مدارها حول الشمس (الدائرة الظاهرية لمسير الشمس.[٢٠] وهذه الزاوية أساسية بالنسبة للمناخ الأرضى؛ حيث تفرض درجة تعرض المناطق المختلفة للشمس خلال الفصول. ويمكن أن ندرك بسهولة أن التغيرات المناخية القاسية كانت ستحدث إذا وقع تغير كبير فى الميلان: هل يمكن أن تتخيل ما قد يحدث لو أن القطبين عزما على التأرجح على خط الاستواء؟ وقد يكون توازن المناخ الأرضى، ومن المحتمل أنه كان شرطًا أساسيًا لتطور كيمياء كانت وراء ظهور الكائنات الحية، هو نتيجة مباشرة لوجود القمر. غير أن حدوث هذا التوازن قد يكون نتيجة حادثة ضعيفة الاحتمال إلى أقصى درجة. ومن الممكن أن ذلك أحد خواص الأرض، أن تكون مجهزة بمثل هذا النظام للميلان الذى يساعد على دوام المناخ، مما يتيح بشكل خاص للماء بأن يظل مستقرًا فى حالة سائلة.

وليس من المؤكد أن المريخ قد استفاد من مثل هذه الآلية: لم يتمكن التطور العنيف أحيانًا لمناخه، تحت تأثير التطور العشوائى لميلانه، من أن يسمح بوجود نطاق من الماء السائل يكفى زمنًا طويلاً لظهور حياة عليه. ويمثل هذا جزء من التحديات التى يضعها المريخ أمامنا: لقد شهد المريخ، الأكثر ضخامة من القمر، مراحل نشاط أكثر تعقيدًا بكثير، كما تشهد بذلك البراكين الهائلة (مثل أولمباس مونس Olympus Mons الذى يتجاوز ارتفاعه ٢٥٠٠٠ متر، وهو الأعلى فى المجموعة الشمسية) وشبكات الأخاديد (القنوات) التى تمد عدة آلاف من الكيلومترات، ومجارى الأنهار والروافد المتعددة، وهى جافة حاليًا. ولهذا السبب فإن المريخ صغير بما يكفى لكى لا يشهد واقعة محو تكويناته السابقة، إلى درجة كافية لأن نميز، على سطحه، مناطق تعود إلى كل مرحلة من تطوره، وقد نستطيع

---

(٢٠) الدائرة الظاهرية لمسير الشمس l`ecliptique: تقاطع سطح مدار الأرض مع القبة السماوية؛ حيث تظهر الشمس تتحرك كما ترى من الأرض. (المترجم)

أن نرصد فيه كل تاريخ أجرام المجموعة الشمسية، حتى الموت الجيولوجى: وهو ما يمثل خاصيته الفريدة فى علم الكواكب المقارن. وبشكل خاص لا يُستبعد أن المريخ قد شهد، فى وقت ظهور الحياة على الأرض نفسه، أحوال شاملة مماثلة: ربما يكون قد احتوى على ماء سائل، نوع من كيمياء ما قبل الحياة، بل علم حياة فلكى.[٢١] وهذا ما يبرر المشروع الضخم للاستكشاف الفضائى للمريخ، وهو ما تريد فرنسا المشاركة فيه بمستوى عالٍ من المسؤولية، الذى تم إعداده: يجب أن يتاح، فى العقد المقبل، اكتشاف مستودعات محتملة من الصخور الرسوبية، ترسم صورة، كما هو الأمر بالنسبة للكربونات الأرضية، للمواقع البحيرية القديمة، وإظهار الجليد الموجود تحت الأرض، الذى قد يكون حاميًا لذخائر من المياه المطمورة، وجمع عينات من مواقع مختارة، ثم العودة بها إلى الأرض، مما يتيح التحليل على مستوى الحبيبات الفردية، باستخدام أجهزة المختبرات الأكثر تقدمًا، ويجب تحقيق وثبة عظيمة فى فهم تاريخ المريخ، وفى النهاية حل المشاكل الأساسية فى تطور كوكبنا نفسه.

البحث عن الشروط الأولية: الكويكبات والنيازك

لا يكفى تعيين القوى ("محركات" الماكينات الكوكبية) لوصف تطور أى جرم: فهذا التطور، مثل ما يحدث بالنسبة لسهم يتم إطلاقه، يتوقف أيضًا على "الشروط" الأولية التى يصطبغ بها هذا الجرم. وفيما يتعلق بالكواكب، ما تلك الشروط الأولية، وبماذا استطاعت أن تلعب دورًا، وكيف نتعرف عليها؟

الشروط الأولية لتطور المجموعة الشمسية على نوعين من الناحية الأساسية، شروط ديناميكية وأخرى تتعلق بالتركيب، ويشمل الجانب الديناميكى على مجمل الصدمات والتصادمات وظواهر المد والجزر التى أثرت على حركات

---

(٢١) علم حياة فلكى exobiologie: فرع من فروع علم الأحياء (البيولوجيا) الذى يدرس الحياة خارج الأرض. (المترجم)

هذه الأجرام، وتجمّع المادة أو هزالها الجزئى، فى بيئة الشمس المركزية. ولقد رأينا مثلاً أن تكوّن القمر، عن طريق التصادم، أمكنه أن يلعب دورًا أساسيًا على التطور اللاحق للأرض.

كيف يمكن أن نجد مدخلاً حاليًا إلى ما كانت عليه الديناميكا البدائية؟ أحد المداخل أن ندرس فى الوقت الحالى منظومات تعكس الشروط الديناميكية لسحابة شمسية أولية (قرص تجمّع disque d`accretion) حيث وُلدت الكواكب. وهناك نوعان منه: نوى الكواكب العملاقة، مع التوابع الكوكبية التى تشدها الجاذبية ومجموعة "الكويكبات". (وأتاح البحث فى القرن التاسع عشر عن وجود كوكب مفترض بين المريخ والمشترى، وقد باء بالفشل، الاكتشاف التدريجى لآلاف الأجرام، التى نعرف عنها أنها فى الواقع أكثر عددًا بكثير أيضًا، وأن الكتلة المدمجة فيها تتجاوز بالكاد كتلة عطارد). وتتحرك تلك الكويكبات حول الشمس على مدارات متقاربة جدًا. ومنذ زمن بعيد كان من المعتقد أنها قد نتجت عن كوكب حدث له انفجار تحت تأثير قوى مد وجزر المشترى، ويُعتقد بالأحرى حاليًا أنها تتعلق بالعكس بأجرام صغيرة لا تحصى حدث انطلاقًا منها، عن طريق التصادم والتجمع، إن كان كوكبًا فى طريقه للتكوّن، عندما تم، على وجه الدقة بسبب ظهور المشترى، وتوقف النمو؛ لذلك فإن الكويكبات التى كانت تتألف من بقية منظومة ديناميكية تكونت الكواكب بواسطتها، حُفظت حتى الوقت الراهن فى حالة ناقصة لنمو مجهض، وأصبحت ظاهرة للرصد: والصدمات بين هذه الأجرام هى وحدها التى عدّلت بشكل محلى بعض الخواص، وقذفت بشظايا كانت فى الأصل كويكبات جمّعتها الأرض.

وتلك الشظايا المقذوفة تعتبر كثيرة أكثر من كونها صغيرة. وتكرار التصادمات الضخمة نادر جدًا: احتمال تلقى الأرض لجرم بحجم كيلومتر يكون على هيئة صدمة كل ١٠٠ مليون سنة. وتحت تأثير صدمة عنيفة بهذا المقدار تكون كمية البقايا المقذوفة فى الغلاف الجوى إلى الدرجة التى تجعل الأرض تعانى من إظلام مستمر؛ أى أنه خلال عدة سنوات، يؤدى غياب الإشعاع الشمسى إلى

إيقاف نمو النباتات: وهناك من يعتقدون أن إحدى هذه الأحداث كانت وراء اختفاء الديناصورات، لعدم توافر الغذاء، منذ نحو ٦٥ مليون سنة، اختفاء أدى إلى أن الثدييات، والإنسان منحدر عنها، قد تمكنت من التطور.

وتتساقط على هيئة أكثر صغرًا بكثير نيازك تقترب كتلتها من كيلوجرام على الأرض بمعدل يقترب من العشرة كل سنة على منطقة بضخامة فرنسا. ومن ثم تم التعرف إجمالاً على عدة آلاف من النيازك فى العالم، تم التقاطها وجمعها فى متاحف لدراستها. ويعكس تنوع النيازك الخاصية نفسها بالنسبة للكويكبات، "وهى الأجرام التى تنتمى إليها"، والتى تتيح تحليلها. ويمكن الإشارة إلى أن بعض منها ناتج عن أجرام "بدائية" جدًا، حتى أنها فيما يبدو لم تشهد أبدًا احتدامًا ذا قيمة كان عليه أن يغير خواصها الأصلية: ونرى أن ذلك فى الحقيقة ما ننتظره من أجرام أكثر صغرًا فى المجموعة الشمسية. وليس من المبالغة التأكيد على أنه بسبب تحليل هذه النيازك الأكثر بدائية يرجع فهمنا للأصل والتطور البدائيين للمجموعة الشمسية.

وكذلك أمكن، مثلاً، التأريخ الدقيق لتكوّن المجموعة الشمسية؛ أى عمر كل تلك الأجرام، بما لا يتجاوز ٤,٥٥ مليار سنة: والشمس والكواكب ليست الجيل الأول فى المجرة. ذلك الجيل كان عمره نحو عشرة مليارات من السنوات عندما تكونت مجموعتنا الشمسية، وهو ما يفسر احتواءها على عناصر "ثقيلة"، أى خلاف الهيدروجين H والهليوم He، والذى تم تركيبه انطلاقًا من الهيدروجين فى قلوب النجوم الضخمة، وهى سابقة على الشمس، ثم أُعيد قذفه فى بيئة ما بين النجوم عند اندثار تلك النجوم التالى لانفجار (سوبرنوفا). وتمثل هذه العناصر (الكربون C، والنتروجين N، والأكسجين O، والألمنيوم Al، والسيليسيوم Si، والحديد Fe.. إلخ) معًا (باستثناء الهيدروجين) ما تتكون منه الأرض والكواكب: الصخور، الغلاف الجوى ومكونات الكائنات الحية. وتتيح النيازك قياس وفرة هذه العناصر.

وتم حديثًا اكتشاف أن بعض النيازك التى تحتوى أيضًا على حبيبات ما قبل شمسية presolaires تكونت فى الأغلفة الجوية لنجوم أخرى، ظلت موجودة فى

مراحل مختلفة من نمو الكواكب الأولية، ثم وُجدت، محبوسة، بخواص تتيح تحديد مواقع التكوين هذه. وبهذا الشكل تم إثبات أن انهيار السديم المبكر قد انطلق على الأرجح بانفجار سوبرنوفا قريب، وهو الذى بذر السحابة بغاز وحبيبات تم تركيبها حديثًا، فى وسط الذرات المقذوفة، وقام بعضها، التى كانت ذات نشاط إشعاعى شديد، بدور مصدر الطاقة الرئيسى للأجرام الكوكبية المبكرة التى قامت باصطياد هذه الحبيبات. وبشكل إجمالى فإنه قد تبين أن تحليلات النيازك خصبة بشكل خاص؛ لأنها تصف فى الوقت نفسه تاريخ و"جغرافية" نشوء الشمس.

البحث عن الشروط الأولية: المذنبات والنيازك بالغة الصغر

لم يكن التأثير الديناميكى الوحيد للظهور العنيف للمشترى هو أن يحفظ مجموعة الكوكبيات، على مسافة ضئيلة نسبيًا من الشمس. بل إنه أحدث أيضًا خللاً شديدًا فى نمو الأجرام وهى فى طريقها للتكاثر بعيدًا عن محوره. وعلى مثل هذه المسافات من الشمس، فإن درجة الحرارة المتوسطة، المنخفضة جدًا، تتيح من الناحية الأساسية للمركبات سريعة التبخر، مثل: الماء وغاز حامض الكربون gsz carbonique ومحلول النشادر، أن توجد متكثفة فى الجليد: وعلى هذه الحالة الرئيسية بالفعل كان نشوء أجرام الكواكب الأولية protoplanetaires بعيدًا عن مدار المشترى. وبفعل المشترى وصل القليل جدًا من الأجرام إلى أحجام ذات شأن: لم تشهد فقط توقف تطورها؛ حيث لم تكن حينئذ إلا فيما ندر سوى أكبر من بضع كيلومترات، ولكن على الأخص أن أغلبها تم قذفه على مسافات شاسعة من الشمس، على مدارات أبعد آلاف المرات من الشمس؛ حيث أصبحت موجودة على الدوام. ولم يكن سوى خطر مرور نجم قريب هو الذى جعل لبعضها مدارًا معرضًا للخلل من جديد، لكى تقع ثانية نحو الشمس وتصبح "مذنبًا". وكلما اقتربت من الشمس، يصعَّد الجليد ويتحول إلى ذيول غازية مميزة، ذات منظر مثير أحيانًا، وتطلق هذه العملية حبيبات صغيرة، وعندما تتلقى الأرض مثل هذه الحبيبات، يتم تدمير بعضها، المخترقة على هيئة بريق فى الغلاف الجوى، إلى "شهب".

وما دامت هذه الكتل الكيلومترية من الجليد، أو "نوى المذنبات"، موجودة فى خزائنها الضخمة البعيدة، فإنها حاليًا فى درجات حرارة منخفضة إلـى حـد أنهـا تحافظ على خواصها الأصلية؛ لذلك لدينا الأسباب الكافية للاعتقـاد بأنهـا كانـت تحتوى دائمًا على جزيئات وحبيبات تكونت منها السحابة الشمسية الأولية. وعندما كانت تغوص فى المجموعة الشمسية الداخلية، كانت تحمل معها شهادة دقيقة، وهى تركيب المادة الأصلية.

وانطلقت فى عام ١٩٨٦، بمناسبة عودة المذنب هالى، لا أقل مـن خمـسة مجسات فضائية (اثنان يابانيان، واثنان سوفيتيان وواحـد أوروبـى هـو جيوتـو Giotto)، لمقابلة هذا المذنب، للتحليق حول نواته نفسها عن قرب شـديد: وصـل جيوتو إلى أقل من ٦٠٠ كم. وللمرة الأولى أصبح من الممكن إجراء عملية رصد بالغة القرب: وتم اكتشاف جرم مختلف تمامًا عن ما كـان متوقعًـا. وكـان مـن المتصور، فيما يخص جرم مكون بشكل أساسى من الجليـد، أن سـيكون سـاطع تمامًا: هو الأكثر قتامة من بين أجرام المجموعة الشمسية كلها، أكثر سـوادًا مـن الكربون. وكنا نتساءل ما إذا كان الكربون كان على الأغلـب علـى هيئـة غـاز كربونى (ثانى أكسيد الكربون CO_2) أو الميثان CH_4: واكتـشفنا أن أكثـر مـن النصف لم يكن على هيئة تلك الجزيئات الصغيرة، لكن على هيئة مركبات بالغـة التعقيد، وهى على وجه الدقة ممتزجة بالجليد، وهو ما يعطى للمذنب هذه الدرجـة من القتامة. وقد يتعلق الأمر ببوليميرات عـضوية ذات أوزان جزيئيـة مرتفعـة، نتجت عند انهيار السحابة الشمسية الأولية، وتم حبسها فى نـوى المـذنبات هـذه وحُفظت حتى وقتنا الراهن: وتتيح لنا دراسة المذنبات مدخلاً إلى مرحلة التطـور الكيميائى النهائية للسحابة الجزيئية التى تنحدر منها المجموعة الشمسية.

ويرى البعض أنه من بين الجزيئات العضوية المعقدة الموجودة فـى تلـك النوى، قد يكون بعض أنواع (ما قبل الحيـوى prebiotiques) قـد لعبـت دورًا أساسيًا لبدء الحياة على الأرض (وربما على سطح كواكب أخرى، والمريخ بـشكل

خاص). وحتى فى الوقت الراهن فإن الأرض، فى رحلتها ما بين الكواكب، تتعرض كل سنة لعدة عشرات الآلاف من الأطنان من مادة المذنبات، وبشكل أساسى على هيئة نيازك بالغة الصغر: ويتعلق الأمر بحبيبات قُذفت من نوى المذنبات مع تحول الجليد إلى الحالة الغازية عند الاقتراب من الشمس، ويتفتت جزء منها على هيئة شهب. ولدينا كل الأسباب للقول بأن هذا المعدل كان أكثر ارتفاعًا بكثير خلال مئات الملايين من السنوات الأولى، عندما كانت المجموعة الشمسية مليئة أيضًا بما لا يُحصى من بقايا الحطام بكل الأحجام. واستطاعت هذه التصادمات أن تساهم فى حمل جزء (على الأقل) من الماء الذى نحصل عليه فى وقتنا الراهن: كل لتر من الماء نشربه يمكن أن يحتوى على الأقل على كوب من ماء المذنبات. وبالطبع فإن طبيعة الماء لا تعتمد على أصله، وكونه يأتى من مذنب لا يغير من خواصه. وبالعكس فإن المساهمة المرتبطة بالمادة العضوية من المذنب، فى المحيطات الأرضية البدائية، منذ أربع مليارات سنة، ربما كان لها تأثيرات أهم: بما أنه تم تخليقها فى السحابة الشمسية الأصلية بعمليات كيميائية كونية محددة تمامًا، فقد يتعلق الأمر بجزيئات وجذور ذات مستوى من التعقد والتفاعلية لا تصل إليه الكيمياء الأرضية المتعلقة بالماء فى ذلك الحين، ولعل وصولها قد ساهم كثيرًا فى دفع التطور نحو المادة الحية.

وحل لغز مادة المذنبات من الأهمية إلى درجة أنه تم إعداد بعثتين فضائيتين مهمتين، إحداهما بواسطة ناسا، ستارداست StarDust، والأخرى بواسطة وكالة الفضاء الأوروبية ESA، وهى بعثة روسيتا Rosetta. وسوف تمر ستارداست، الموجودة حاليًا فى الفضاء، بذيل مذنب، لكى تجمع منه الحبيبات، ثم تعود بها إلى الأرض فى عام ٢٠٠٦: والأمل فى إمكان تحليل هذه المادة، حبة بحبة، وتحديد تركيبها. وروسيتا التى تطلق من كورور Kourou فى ١٨ يناير ٢٠٠٣، معدة للالتقاء بنواة مذنب لكى تتخذ مدارًا وتحلله خلال عدة أشهر، ثم يتم قذف آلة صغيرة وزنها ٨٠ كج فى المذنب؛ لكى توضع فى النواة نفسها، تثقب التربة وتأخذ عينات، وتحللها فى مكانها الأصلى، بأفضل أداءات الأجهزة المتاحة فى الوقت

الراهن: روبوتات مقدامة فعلاً يجب عليها أن تحاول، بطريقة آلية تماماً، تحديد تركيب العناصر، والنظائر والتركيب الجزيئى والتعدينى لكل هذه المادة من المذنب: الجليد والحبيبات، والمعادن، كاسرة الأشعة والعضوية، كذلك بقايا المادة التى يعود أصلها إلى المجموعة الشمسية. وموعدنا معها فى أكتوبر ٢٠١٢.

الباب الرابع

الكواكب والمجرات

علم الأنساب السماوى للمادة[1]

بقلم: ميشيل كاسيه

Michel CASSE

ترجمة: عزت عامر

المادة المضيئة والنفيسة والسماوية

تنقسم المادة إلى نوعين: باريونية[2] (نووية) غير باريونية (غير نووية)، وانبثق الشكلان من الانفجار العظيم. والنوع الأول حساس للضوء - ومن ثم للتفاعل الكهرومغناطيسى البناء - والثانى محايد ولا يتفاعل. وتدخل المادة النووية فى بنية الأجرام (النجوم، والسحب، والبشر)، بينما تبقى المادة الثانية فى حالة جسيمات مبعثرة لا تدخل إلا فى علاقات عن طريق الجاذبية.

وعلى المستوى الكلى تمثل المادة (السوداء) غير الباريونية نحو ٣٠ فى المائة من الكون، فى حين أن المادة النووية لا تتخطى ٢ أو ٣ فى المائة، والباقى، فى "جوهره"، مادة لها خاصية تنافرية للإسراع بتمدد الكون، حسب قول النظرة الجديدة فى علم الكون.

وعلى مستوى سكة التبانة[3] لا تحتوى المادة النووية إلا على نصيب ملائم (نحو ١٠ فى المائة). وتسيد على الهالة المجرية كثرة المادة السوداء التى تعتبر من الجانب الأساسى غير باريونية، وتتكون من جسيمات ثقيلة غير ميالة إلى

(١) نص المحاضرة رقم ١٩٢ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٠ يوليو ٢٠٠٠.

(٢) باريونية barionique: من باريون وهو النوع الثقيل من المادة مثل: البروتون والنيوترون. (المترجم)

(٣) سكة التبانة Voie Lactee: حزام خافت الضوء غير منتظم ومحدد يحيط بالسماء فى دائرة عظمى تقريبًا. وتحدث هذه الظاهرة الضوئية بفعل عديد من النجوم والسحب النجومية وكذلك تجمعات مادة ما بين النجوم. (المترجم)

التفاعلات القوية والكهرومغناطيسية وأيضًا الجسيمات الافتراضية التى يطلق عليها نيوترالينو.[٤]

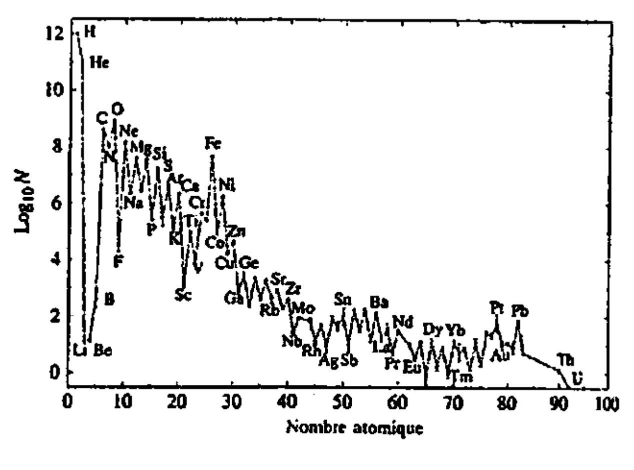
والمادة العادية والمألوفة، مثل مادة الأحجار والأشجار، والزهور والسيول، والنبيذ والفراشات، والدم والدموع، تستحق وصفها بأنها نفيسة، مضيئة وسماوية لأنها نادرة، وحساسة للضوء وآتية من السماء. ولن نستبقى سوى الأحكام البسيطة عن المادة النووية، تلك التى تكون ساخنة تلمع. والتى لا تلمع تمتص الضوء. وتلك التى تبث أو تحجز إشارات ضوئية تسمح بالتحليل الكيميائى.

والمادة الذرية الساخنة تلمع، وإذا كانت باردة فإنها تمتص الضوء. ولا نحتاج إلى المزيد لكى يزدهر كل علم فلك الظلام والنور، والسحب والنجوم. وأيضًا مدى قدرتنا على التحديد الكمى لتركيب كل تنويعة من بيئات طبيعيات النجوم، أو البيئات الكوكبية أو بيئات السحب. وأتاحت التطورات المدهشة فى مباحث الأطياف خلال السنوات الأخيرة، بالتوافق مع التلسكوبات ذات المدى الواسع (مثل HST وVLT وKeck)، قفزة نوعية فى قياسات تركيب مجموعة كبيرة من النجوم وسحب ما بين النجوم وحتى ما هو خارج المجرات، وتم التوسع جدًا فى نموذج القياس. وبشكل خاص تم إجراء القياسات الدقيقة للغزارة فى الغلاف الجوى للنجوم الأكثر قدمًا بكثير من الشمس، التى تنتمى إلى الهالة المجرية أو فى سحب خارج المجرات البعيدة (مما يعنى الرجوع إلى الوراء من الناحية الزمنية) التى تمتص ضوء النجوم الزائفة (الكوازارات). ويمكن مقارنة تلك التركيبات بتركيب المجموعة الشمسية واستنتاج بضع نزعات تطورية (الشكل ١).

وتتضمن الشمس، فى كتلتها، الجزء الأكبر من المجموعة الشمسية، وعلى هذا الاعتبار فإنها أكثر تمثيلاً للمجموعة من الكواكب التى كانت موطنًا للانقسامات الكيميائية الكثيفة.

---

(٤) نيوترالينو neutralino: جسيم افتراضى وجزء من المزاوجة بين مجموعة الجسيمات المتنوعة التى تتنبأ بها نظريات التناظر الفائق. (المترجم)



الشكل (١)

جدول غزارة العناصر في المجموعة الشمسية.

نلاحظ بين الخطوط البارزة فى توزيع الغزارة:

- ذروة الهيدروجين ($Z = 1$) وقمة الهليوم (٢).
- الأخدود العميق الذى يفصل بين الهليوم والكربون (٦).
- التكاثر المتصل ابتداء من منطقة الكربون/الأكسجين (٦ – ٨) حتى الكالسيوم (٢٠)
- وادى الإسكنديوم (٢١) تتبعه رأس الحديد (٢٦).
- المنظر الطبيعى لأسنان المنشار الذى يهبط فى انحناء خفيف نحو التلال الصغيرة للبلاتين (٧٨) والرصاص (٨٢).
- الربوع المنبسطة للتوريوم (٩٠) وللأورانيوم (٩٢).

لذلك يمكن مقارنة سطح الشمس النيّر photosphere بنظيره فى النيازك، الأحجار التى تسقط من السماء، والمصدر الثانى للمعلومات عن تركيب السحب الشمسية الأصلية، هذا فى حالة استبعاد العناصر الطيّارة (الهيدروجين، والهليوم، والكربون، والنتروجين، والأكسجين، والنيون) التى أفلت بعض منها من النيازك منذ تكوّنها.

غير أن نيازك الكوندوريت[٥] الكربونية، التى تمثل جزءا طفيفًا من مادة المجموعة الشمسية، تحفظ فى قلبها تركيبها الأصلى؛ لأنها إذا استبعدنا العناصر الطيارة، لم تتأثر إلا قليلاً بالتحولية.[٦] والتطابق جيد بين مصدرى المعطيات، إضافة إلى أن تحليل النيازك فى المختبر يتيح تعيين التركيب متشابه الخواص isotopique للمادة المكونة للمجموعة الشمسية، بافتراض أنه غير قابل للتقدير بالنسبة لمن يريد أن يعرف أصل وتطور النوى الذرية.

وهكذا توطدت موازنة تركيب السحابة السلفية التى خرجت منها المجموعة الشمسية: فى جرام من المادة يمكن حساب ٠,٧٢ جرام من الهيدروجين، و٠,٢٦ جرام هليوم، و٠,٠٢ جرام من العناصر الثقيلة. وعلى الرغم من بهاء الشمس وسحابتها الأم فإنهما فقيرتان فى المادة بشكل خاص، حيث إنهما لا تحتويان سوى على ٢ فى المائة من المادة الخاصة بهما، لكن ذلك يعتبر ثروة مقارنة بالكواكب القديمة للهالة المجرية التى يمكن فى هذه الحالة وصفها بأنها محددة النفقات بالنسبة لانعدام المعدنيات.

وتضع الفيزياء الفلكية النووية أمامها هدفًا يتمثل فى تعيين الآليات التفصيلية التى توجه تكوين كل نوع نووى تنشأ عنه الطبيعة، من الدوتريوم (نويتان) حتى الأورانيوم (٢٣٨ نوية)، وموقعها الفيزيائى الفلكى فى الإنتاج، وتسلسل الظواهر النووية التى تشكل تعقد المادة الذرية فى المجرات. وبشكل أكثر دقة، فإنها ترمى إلى تفسير تركيب المجموعة الشمسية، والنزعات الشديدة للتطور الكيميائى للمجرة (الاغتناء المتوالى بالمادة، بكميات نسبية من العناصر).

---

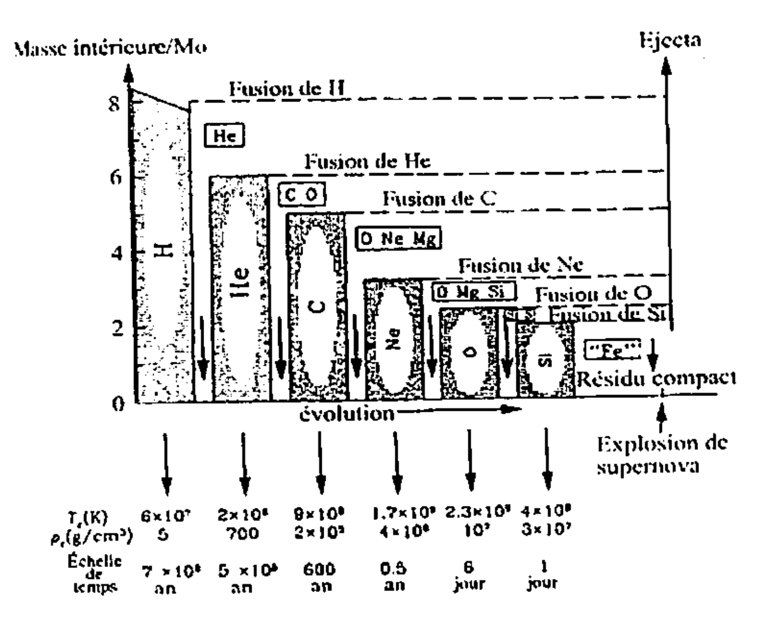
(٥) الكوندوريتchondrite أو chondorite: نيزك حجرى يتميز بكرات صغيرة وكثيرة ويقال نيزك حجرى حبيبى. (المترجم)

(٦) التحولية metamorphisme: تغير فى بنية الصخر ناشئ عن الضغط والحرارة والماء يفضى إلى حالة أشد إحكامًا وتبلورًا. (المترجم)

ومن الهيدروجين إلى الأورانيوم توطدت بعناية مصادر النوى الذرية. وتلك المصادر هى الانفجار العظيم (الهيدروجين والهليوم وكسرة من الليثيوم ٧)، والإشعاع الكونى (الليثيوم والبريليوم والبور) وكل النجوم كما سنرى.

التطور النجمى والتخلق النووى

تلمع النجوم لأنها تحول العناصر وتؤسس التفاعلات النووية مصدر طاقة النجوم، والكميات النسبية من النظائر المختلفة فى الطبيعة، ما بين الكربون والأورانيوم، هى نتيجة للتخليق النووى nucleosynthese للنجوم. ونستطلع المجهول من هذه العوامل بمحاكاة وجودها بطريقة النماذج الفيزيائية الرياضية.



الشكل (٢)

التطور البيانى لبنية داخلية لنجم له ٢٥ كتلة شمسية.

(تبعًا لمارسيل أرنولد من جامعة ليبر فى بروكسل).

يمكننا أن نميّز، باللون الرمادى، المراحل المختلفة للاحتراق، كذلك منتجاتها الرئيسية، وبين مرحلتى احتراق يتقلص قلب النجم وترتفع درجة الحرارة المركزية.

وتصبح مراحل الاحتراق أقصر فأقصر. وقبل الاحتراق يكون للنجم بنية متدرجة.

يكون القلب مليئًا بالحديد والسطح الخارجى بالهيدروجين، وما بينهما بالعناصر المتوسطة.

يُحدث انهيار ثم تمدد (ارتداد) القلب موجة صدمة تشعل من جديد التفاعلات النووية فى الأعماق وتدفع إلى الفضاء الطبقات التى تخترقها.

يبرد القلب المنهار بإطلاق جسيمات نوترينو لكى يصبح نجمًا نترونيًا (بل ثقبًا أسود).

يتم تحرير الجزء الأكبر من طاقة الجاذبية المصاحبة لانفجار القلب إلى الداخل ($١٠^{٥٣}$ إرج) فى نحو ١٠ ثوان على هيئة جسيمات نوترينو.

ويقتصر أداء الجسيمات التى تدخل فى التفاعلات النووية على p, n, e^+, e^-, v.
وهى منظمة بواسطة أربع قوى متعارف عليها فى الفيزياء (الشديدة والضعيفة والكهرومغناطيسية والجاذبية). والنجم الذى تتم محاكاته ليس هو النجم الحقيقى لكنه يشاركه فى الخواص الأساسية. وتقوم نماذج بنية وتطور النجوم على قواعد عامة للاتزان الميكانيكى والطاقى، ويقتصر النجم النظرى على بضع معادلات للتوازن، لكنها ليست مستقلة. ولا تتالى التفاعلات النووية خطوة بخطوة، وكذلك حال التركيب الناتج عنها. ويتم اعتبار التركيب الكيميائى الذى ننطلق منه كوسط ما بين النجوم حيث ظهر النجم موضع البحث.

ويتم حل المعادلات التفاضلية بالاستعانة بمجموعات رقمية كاملة، وفى النتائج نقرأ فى قائمة الخواص المختلفة لكل أغوار النجوم (درجة الحرارة، الكثافة، التركيب وكل البارامترات المرتبطة بها) كل ذلك على امتداد الزمن. (شكل ٢).

وتم تتبع المراحل النهائية للتطور النجمى (والتى تعتبر أيضًا الأكثر تعقيدًا) بعناية خاصة إلى حد ما حيث إنها تنتهى إلى قذف جزء من المادة التى صنعها النجم.

وخلال انفجار نجم سوبرنوفا (متجدد أعظم) ضخم، مثلاً، تصل درجة الحرارة إلى درجات قصوى (٥ مليارات درجة فى الطبقة الغنية بالسيليسيوم) وتعمل التفاعلات النووية بسرعة بالغة الارتفاع حتى أن التفاعل الضعيف (والبطىء) لا يكون لديه الوقت لكى يظهر. ولا يتحقق تحول البروتونات إلى نترونات بشكل فعلى، حتى أن الفضاء النووى الذى يشيع تخليقه يكون نيكل – ٥٦ (وهو فقير فى النترونات). ويتم قذفه فى الفضاء ليتحول فى قلبه بروتون إلى نترون ثم نترون آخر؛ لكى تكتمل بنيته النووية. ويستغرق التحول الأول ٧ أيام فى المتوسط، والثانى ٧٧. ولا تكون النواة الناتجة سوى الحديد – ٥٦.

وخلال التفتت الأخير يتم بث أشعة جاما ذات الطاقة الخاصة جدًا (٨٤٧ كيلو فولت). وحصل هذا التنبؤ النظرى على إثبات، عندما حدث فجأة، فى شتاء ١٩٨٧، أن شرّف سوبرنوفا سحابة ماجلان العظمى بوجوده.

يمكن تمييز مجموعتين مختلفتين من السوبرنوفا: الأولى ناتجة عن انهيار قلب نجوم ضخمة، لتكوين نجوم نيوترونية، (وربما ثقوب سوداء) والتي، لكي تبرد، تبث فيضًا كثيفًا من جسيمات نوترينو. والمجموعة الثانية لا تُبقي أي نجم متماسك ولا تبث أي نوترينو، لكنها بالعكس تستدعي قزمًا أبيض يكون سببًا في فناء مرافقه. وتمثل الأخيرة نوع السوبرنوفا الجاذبي، والأخرى نوع السوبرنوفا الحراري النووي.

وهذا التصنيف مكرس لأن يحل محل التصنيف الخاص بعلم الطيف إلى النوع ٢ والنوع ١، تبعًا لكون الطيف يركّز خطوط طيف الهيدروجين أم لا، وهو تصنيف أصبح ملتبسًا. غير أنه يتم الاحتفاظ بالتسمية SNIa لوصف نجوم السوبرنوفا الباهرة التي يكون فيها لمنحنى الضوء انحرافات خاصة وحيث يلمع الهيدروجين بانعدامه.

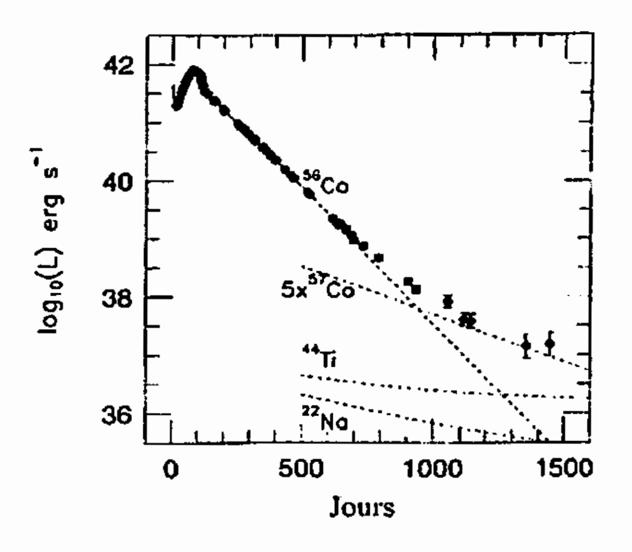
ونوعا السوبرنوفا ١ ب (Ib) و١ ج (Ic) هما في الحقيقة من السوبرنوفا التي يكون طراز الانفجار فيها مشابهًا لنظيره في النوع ٢.

ويعتبر SN 1987a، سوبرنوفا القرن، وحتى سوبرنوفا العصور الحديثة، بكل تأكيد سوبرنوفا من النوع ٢: لم يكن منبعه (MO 20) يختلف بمقدار كبير عن رجل الجبار Rigel، وهو أجمل نجمًا أزرق في برج الجبار، وهو ما نعرفه حيث تم التقاط صورة فوتوغرافية له قبل فنائه.

وكانت فرصة فريدة قد أُتيحت لنا لأن نختبر نظرية انفجار النجوم وعملية التخليق النووي التي تلتها، وتنبأت هذه النظرية بأن النظائر ذات الكتل ٤٤، و٥٦، و٥٧ جاءت نتيجة الانضمام الفجائي، المتفجر، لجسيمات ألفا (أو نوى الهليوم) والبروتونات في نوى السليسيوم، ولأنها تخلقت على هيئة أصلها المشع (نيكل – ٥٦، نيكل – ٥٧، وتيتان – ٤٤)، فإن النوى المبعثرة في بقايا السوبرنوفا، في نهاية

التفتت المتسلسل، أصبح لها هيئة مستقرة (الحديد - ٥٦، والحديد - ٥٧، والكالسيوم - ٤٤). ولم يمكن لهذا النشاط الإشعاعى أن يظل غير منظور (الشكل ٣).

وهكذا وصلت رسالة السوبرنوفا الماجلانى، التـى تـأخرت ١٧٠٠٠٠ سـنة بسبب مسافة الجرم، فى الوقت المناسب: ذلك الوقت الذى كان البشر قد توصلوا فيه إلى نماذج فيزيائية وأجهزة كمبيوتر قادرة على العودة بواسطة الحساب إلى ما كـان عليه تطور النجوم. إنها بالطبع رسالة مختلفة، لكنهـا رسـالة صـحيحة: وصـلت جسيمات النوترينو متقدمة عدة ساعات فى الضوء، كما تم التنبؤ به، وبالعدد المتوقع.



الشكل (٣)

ميل سطوع SN 1987A.

فى ٢٣ فبراير ١٩٨٧، أعلن شيلتون helton وجونيس Jones اكتشاف

سوبرنوفا فى سحابة مجلان العظمى.

كان ذلك الأكثر لمعاناً من بين كل ما استطاع الإنسان تسجيله منذ زمن

كبلر Kepler

(١٦٠٤). والأول من نوعه الذى يمكن فحصه فى كل قطاعات الطيف

الكهرومغناطيسى، والأول أيضًا، الذى تم رصده بواسطة فيضه من
جسيمات النوترينو، وأتاحت مسافته القريبة نسبيًا (١٧٠٠٠٠ سنة
ضوئية) فرصة فريدة لرصد سوبرنوفا بتفصيل كبير، بواسطة تنويعة من
تقنيات الرصد المختلفة.

ويتبـــع ميل انحناء ضوء الســـوبرنوفا، الذى اســـتمر ٢٠٠ يوم، هبوط
فى النشـــاط الإشـــعاعى ل ^{56}Co (نصف العمر يساوى ٧٧ يومًا)، الأب
لـــ ^{56}Fe وابن ^{56}Ni. ثم يواصل ضوء السوبرنوفا بعد ذلك مساره حتى
هبوط ^{57}Co و ^{44}Ti خلال فترات زمنية أكثر طولاً، وهو ما ينتج عنه
جرم مشع تمامًا.

وتتطابق الطاقة التى تقدمها النوى الراديوية radionucleids (الخط
المنقوط) مع كميات أولية من ^{56}Ni، و ^{57}Ni و ^{44}Ti مقدارها ٠,٠٧٥،
و٠,٠٠٩، و٠,٠٠٠١ Mo على التتالى.

وتقترب السوبرنوفا الحرارية النووية، من جهتها، من ناحية عملهـــا، مـــن القنابل التى تحمل الاسم نفسه. وتتضمن طبيعتها، العنيفة والمعقدة، عمليات تبـــادل للمادة بين نجمين، تبادل تتحكم فيه الجاذبية.

وما نحن متأكدون منه، فى مقابل ذلك، هو هوية النجم المتفجر: قزم أبيض. والأقزام البيضـاء المكتظة بالمادة تتجاوز الكتلة الحرجة ١,٤ MO كتلـــة شمـــسية، وتنفجر مثل القنابل، بدون أن تترك أى أثر سوى إشارة ضوئية عنيفة وسحابة فـــى حالة تمدد (بقية سوبرنوفا). والانفجار نتيجة الاحتراق النووى المروع للكربون فى جسم الأقزام البيضاء.

ومن الصفات المثيرة لنجوم السوبرنوفا SNIa أنها تقدم درجة تشابه لافتـــة للنظر، أكثر بكثير من كل الأنواع الأخرى من السوبرنوفا، ولدرجـــة أن تطورهـــا الطيفى قابل للاستنساخ. ولو أننا استبعدنا بعضًا من غير المرغـــوب فيهـــا، فـــإن

الانحناءات الضوئية تبين تجانسًا مثيرًا. وتشتت المقادير المطلقة للضوء فى النجوم يكون ٠,٢ مقدار، بالتقريب، فى كل النماذج التى تم تحليلها وأقل من ذلـــك بكثيــر بالنسبة لـــ SN الأنواع الأخرى.

وتعتبر SNIa أيضًا معايير لقوة الإشـــعاع، أو إذا فـــضلنا، للعـــودة إلـــى المصطلح المستخدم فى علم الكون، لشموع قياسية chandelles standards.

وتُدرج نجوم السوبرنوفا، بدون تمييز النوع، بين أجمل زهرات علم الفلـــك. وهى محركات التطور المجرى. وليست بخيلة لا فى الطاقة ($١٠^{٥١}$ ارج)، ولا فى صنع المادة (٢ Mo كتلة شمسية من الأكسجين و ٠,٦ Mo كتلة شمسية من الحديد على التتالى بالنسبة للنوعين).

ولا تنتج المجموعتان المختلفتان من السوبرنوفا العناصر بالنـــسب نفـــسها، ولا تنفجر بالإيقاع نفسه (١ حرارية نووية لكل خمس جاذبية).

وتنتج السوبرنوفا الجاذبية بفعالية كميـــات مـــن العناصـــر بـــين الكربـــون والكالسيوم، والأكسجين هو الأكثر غزارة، عندما لا تشح رفاقها الحرارية النوويـــة بالحديد والعناصر القريبة. وتبعًا للتقديرات فإن نحو ٥٠ فى المائـــة مـــن الحديـــد يصبح SNIa (الشكل ٤).

العنصر	١٣ كتلة شمسية	١٥ كتلة شمسية	٢٠ كتلة شمسية	٢٥ كتلة شمسية
كربون C	٠,٠٦٠	٠,٠٨٣	٠,١١٥	٠,١٤٨
أكسجين O	٠,٢٠٨	٠,٤٣٣	١,٤٨٠	٣,٠٠٠
نيون Ne	٠,٠٢٨	٠,٠٣٩	٠,٢٥٧	٠,٦٣١
مغنيزيوم Mg	٠,٠١٢	٠,٠٤٦	٠,١٨٢	٠,٢١٩
سيليسيوم Si	٠,٠٤٧	٠,٠٧١	٠,٠٥٩	٠,١١٦
كبريت S	٠,٠٢٦	٠,٠٢٣	٠,٠٢٥	٠,٠٤٠
أرجون Ar	٠,٠٠٥٥	٠,٠٠٤٠	٠,٠٠٤٥	٠,٠٠٧٢
كالسيوم Ca	٠,٠٠٥٣	٠,٠٠٣٣	٠,٠٠٣٧	٠,٠٠٦٢
حديد Fe	؟٠,١٥٠	؟٠,٢٢٠	٠,٠٧٥	؟٠,٠٥٠

الشكل (٤)

المواد الضئيلة من مواد النجوم معبر عنها بالكتلة الشمسية.
كميات الحديد المقذوف بها غير مؤكدة لعدم إمكانية التعيين الدقيق للحدود بين المادة التى تتبدد وتلك التى تظل حبيسة النجم النوترونى.

وتعتبر غزارة جسيمات النوترون فى المادة التى تفلت تمامًا قبل أن تقع تحت تأثير جاذبية النجم النوترونى موقعًا واعدًا للتطور r الذى يهىء النوى الأكثر ثقلاً فى الطبيعة (حتى الأورانيوم) بالأسر السريع للنوترونات. ويبدو أن خليطًا بالنسب المناسبة من الاثنين يوضح، على الأقل من الناحية النوعية، وفرة المجموعة الشمسية. وتتيح الـ SNII كل العناصر بين الأكسجين والكالسيوم، وتحمل الـ SNI اللمسة الأخيرة لقمة الحديد.

التطور الكيميائى للمجرة

لعبة حاذقة، لكنها أيضًا غير مؤكدة، ويعد التطور المجرى بمستقبل باهر؛ لأنه وحده يتيح تفسيرًا لمسار تاريخ المادة فى مختلف مناطق الكون.

المجرة منظومة ذات بنية ومنظومة تطورية، تتكون من قرص وهالة، ذات تركيب وتاريخ مختلفين. وتتصف مجموعة نجوم الهالة بالدرجة الأولى بحركات (سرعات ومدارات) خاصة، وثانيًا بالفقر المدقع فى المواد.

والهالة هى مملكة المادة السوداء والنجوم القديمة (المحتشدة فى مناطق الركام الكروى أو النجوم المشتتة). وهناك توقف كل تكوّن للنجوم والأجرام متجردة (فقيرة فى المادة)، فى مدار حول المجرة، تتبع مسارها بلا كلل، وهناك حافظت المادة على شكل بدائى تمامًا.

وفى القرص تُنتج السحب خطوط نجوم، ويتخلق عن النجوم مجموعة متنوعة كاملة من نوى الذرات باستثناء الأكثر خفة، وتترك وراءها بقايا متماسكة، وأقزام بيضاء، ونجوم نوترونية، وثقوب سوداء. جيل فجيل من النجوم وتغتنى بيئة ما بين النجوم بالعناصر المعقدة، الملائمة للحياة. نوى الذرات، التى طردتها النجوم، تحيط بها الإلكترونات وترتبط بسلاسل الجزيئات فى برودة السحب حيث تولد كل الكيمياء.

وفى التمرين الذى يتضمن عمل نماذج للتطور الكيميائى للمجرة (وكل المجرات) يتم وضع بضع قواعد تمثل فى هذه الحالة الشروط الأولية، والتركيب الأولى هو ذلك الذى نتج عن الانفجار الأعظم: ٧٦ فى المائة هيدروجين و٢٤ هليوم، وتقوم هذه المادة الأولية بدور القوت بالنسبة لدورات التحول التالية:

غاز ←—— نجم

نجم ←— غاز محمّل بنواتج جديدة + بقايا متماسكة.

ويعمل كل نجم على تكوين واستكمال المواد ويكدس فى باطنــه الأكــسجين المفيد، والسيليسيوم والحديد، وتصب مساهمة كل نجم فى خزان المجرة. والمــواد الضئيلة تتكون من عدد محدد من الذرات من كل نوع، وهو ما يتم الاقتطاع منــه. وكل يدفع تبعًا لكتلته. والأكثر ضخامة هى النجوم الأكثر سخاء وتــدفع بــسرعة أعلى. ويتم الاقتطاع، من نجم فنجم، كما يحدده جدول التوزيع السابق ذكره.

وتعتبر النجوم الــضخمة، بتــدخلات الــسوبرنوفا، والنجــوم ذات الكتــل المتوسطة، أمهات السدم الكوكبية هى الأكثر سخاء. وتلك هى المحركات الحقيقيــة للتطور الكيميائى للمجرة، وتسطع النجوم ضئيلة الكتلة (< ١ كتلة شمسية) باقتصاد ويكون تطورها على درجة من البطء حتى أنه يمكن أن نتوقع أيــضًا ازدهارهــا الفائض. وإذا كانت النجوم ذات الكتلة الأكبر من كتلة الشمس الــشابة تلعــب فــى الاقتصاد العام للكون دور أرباب الحرف أصحاب الضمير، فإن الأجرام الــسوداء والنجوم الصغيرة تلعب دور الأعباء.

وبالتدريج، يتحول الغاز المجرى إلى نجوم، ومنها يعود جزء من مادتهــا إلــى بيئتها المغذية والأصلية، ولكن مجرد جزء فقط. وبهذا العمل يكون الغاز هو الخاســر، وينتهى به الأمر إلى أن يُستنفد. وينتهى إلى أجل مسمى تكوين النجــوم. ولــو كانــت نجوم السوبرنوفا أكثر ندرة على الدوام لما تغير تركيب المجرة أكثر مما هى عليه.

ويتطابق هذا الوصف للتطور الكيميائى لدرب اللبّانة مع الأرصاد. وكــذلك وصلت نسبة حديد النجوم منذ العديد من مليارات السنوات إلى أقصاها، مما يــشير إلى تباطؤ واضح للتطور النووى.

ومع ذلك فإن الحديد، ملك التخلق النووى، له نواة تعتبر الأكثــر صــلابة. وعلى فرض أن الشكل الأكثر مقاومة مكرس لأن يسود، نستنتج أن النجوم تمهــد لقدومها. ومع ذلك فإنه لم يسد، وانطمس الخيال المروع لكون معدنى.

وهناك العديد من التفسيرات لذلك. يهتم الأول بــوهن (مؤســس) السلــسلة النووية التى تربط الهيدروجين (عنصر أولى) بالحديد، على مــستوى النــوى ذات

الكتل من ٥ إلى ٦ (المزعزعة)، ويخفق التخليق النووى للانفجار العظيم عند الرقم ٧. وكان التمدد سريع جدًا أسرع من أن يتيح للكربون أن يتكوّن. وعدم الاستقرار الذى تعرضت له تسلسلات الهليوم كان السبب فى ذلك. والثانى أن إنتـاج الحديـد انخفض بسبب أن جزءًا مركزيًا من النجوم الضخمة، حيث يتكاثر الحديد، انفجـر إلى الداخل وتحول إلى نجم نوترونى أو ما هو أسوأ أيضًا، إلى ثقب أسود. والثالث أن نجوم السوبرنوفا من النوع Ia (ثمرة حياة زوج من نجوم محددة) تعتبر نـادرة. والرابع هو ما سوف نقدمه: المجرة تلمع بنيرانها الأخيـرة وتطورهـا الكيميـائى يقترب من نهايته.

خاتمة: الفيزياء الفلكية المتفجرة

السوبرنوفا! انفجار نجوم يتلوه تفتت النوى المشعة: الفيزياء الكارثيـة هـى تلك التى شغلت جيلاً كاملاً من علماء الفيزياء الفلكية ومن جانب آخـر لا يمكـن اعتبارها وديعة ومسالمة. ووقائع البذخ هذه تعتبر من الآن موضوعًا يثير اهتمامًـا إلى درجة أنه يمكن القول إن البشرية قد دخلت عصر نجوم السوبرنوفا.

المراجع:

- ARNOULD (M.) et TAKAHASHI (K.), « Nuclear Astrophysics », *Reports on Progress in Physics*, 1999, 62, 393.
- ARNETT (D.), *Supernovae and Nucleosynthesis*, Princeton University Press, 1996.
- AUDOUZE (J.), MUSSET (P.) et PATY (M.) (coordonateurs), « Les particules et l'univers », *Nouvelle Encyclopédie Diderot*, PUF, 1990.
- CASSÉ (M.), *Généalogie de la matière*, Odile Jacob, 2000.
- CLAYTON (D. D.), *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, The University of Chicago Press, 1983.

- LEHOUCQ (R.) et CASSÉ (M.), *in* « Supernovae », *Les Houches*, North Holland, 1990, p. 589.
- PRANTZOS (N.) et MONTMERLE (T.), *Naissance, vie et mort des étoiles*, Que sais-je ?, PUF, 1998.
- ROLFS (C.) et RODNEY (W. S.), *Cauldrons in the Cosmos*, The University of Chicago Press, 1988.
- VALENTIN (L.), *Physique subatomique : noyaux et particules*, vol I et II, Collection enseignement des sciences, 1982.
- SLEZAL (E.) et THÉVENIN (F.), *Nucléosynthèse et abondance dans l'univers*, 1998, Cépaduès Éditions.

ما النجم؟[٧]

بقلم: سيلفى فوكلير

Sylvie VAUCLAIR

ترجمة: عزت عامر

مقدمة

يعتبر علم الفلك هو العلم الأقدم بين العلوم: منذ أقدم الأزمنة كان البشر ينظرون إلى السماء ويدرسون حركة تلك النقاط اللامعة التى تمثل النجوم فى "الكرة السماوية"، وجمعوها فى كوكبات وأسقطوا على السماء أساطيرهم الأرضية.

ومع ذلك لم يحدث إلا خلال القرن العشرين أن تم الكشف العميق لبنية وتركيب وتطور النجوم، وفهمها. وكان يلزم قبل ذلك اكتشاف الطاقة النووية، التى تغذى النجوم وتتيح لها أن تستمر فى البقاء خلال مليارات السنوات، كذلك كان يلزم وجود كل الأدوات الفيزيائية المعاصرة، وكان يلزم بشكل خاص أن يتم اختراع أجهزة الكمبيوتر والأدوات الرقمية؛ لأن المعادلات التى تحكم البنية الداخلية للنجوم لا يمكن حلها بالحساب التحليلى البسيط.

ويا له من طريق تم قطعه فى قرن واحد ويكفى، للقياس، أن نعيد قراءة النصوص التى كتبها كاميل فلاماريون Camille Flammarion فى كتابه "علم الفلك الشعبى"، فى ١٨٨٠. وأمام استحالة تفسير الطاقة الشمسية، كتب بتفاصح: "الحرارة التى تبثها الشمس فى كل ثانية تساوى تلك الناتجة عن احتراق أحد عشر مليون تريليون وستمائة ألف مليار طن من فحم الأرض يتم حرقها معًا، وهذه الحرارة نفسها تجعل تريليونين وتسعمائة مليار كيلومتر مكعب من الماء عند درجة حرارة الجليد يغلى فى الساعة. كما لو أن نملة تحاول أن تشرب المحيط".

---

(٧) نص المحاضرة رقم ١٩٣ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١١ يوليو ٢٠٠٠.

وفى هذه الحالة فإن علم القرن العشرين هو النملة التى شربت المحيط. وبعد أن أصبحت النجوم مألوفة، فإنها كشفت لنا أهميتها الأساسية فى الكون: إنها محركات التطور للعالم، وندين لها بتكون كل العناصر تقريبًا التى تتكون منها المادة المحيطة بنا والتى منها نتكون نحن أنفسنا.

لكن النجوم لم تفضِ لنا بعد بكل أسرارها: لقد انتقلت، فى نهاية القرن تلك، المعرفة بهذه الأجرام السماوية الفاتنة إلى بعد جديد، بفضل اكتشاف اهتزازاتها. وأدت دراسة "الذبذبات الشمسية"، خلال نحو عشرين عامًا، إلى مولد علم جديد، يطلق عليه "علم الزلازل الشمسية heliosismology". وسوف يشهد القرن الواحد والعشرين تطور وتمجيد "علم الزلازل الفلكية astrosismology"، دراسة الذبذبات (أو الاهتزازات) النجمية. وهناك اكتشافات جديدة ومثيرة، تتعلق ببنية وتطور النجوم، فى طريقها بالتأكيد لأن تستكمل المعارف الراهنة، بفضل برامج التجارب الفضائية خلال العقد القادم.

معرفة النجوم: الأرصاد

كل ما نعرفه عن النجوم ينشأ من تحليل الأشعة التى تصل إلينا من نقطة صغيرة مضيئة فى السماء. وبرصد النجوم بواسطة التلسكوبات الأكثر ضخامة، فإن النجوم تكون بعيدة إلى درجة أنها تبدو دائمًا دقيقة، حتى لو كانت فى الحقيقة ذات أبعاد أضخم مائة مرة إلى عشرة آلاف مرة من أبعاد الأرض. لكن كم من الثراء العلمى والاكتشافات العلمية الدقيقة التى تنطلق من الدراسة التفصيلية للضوء!

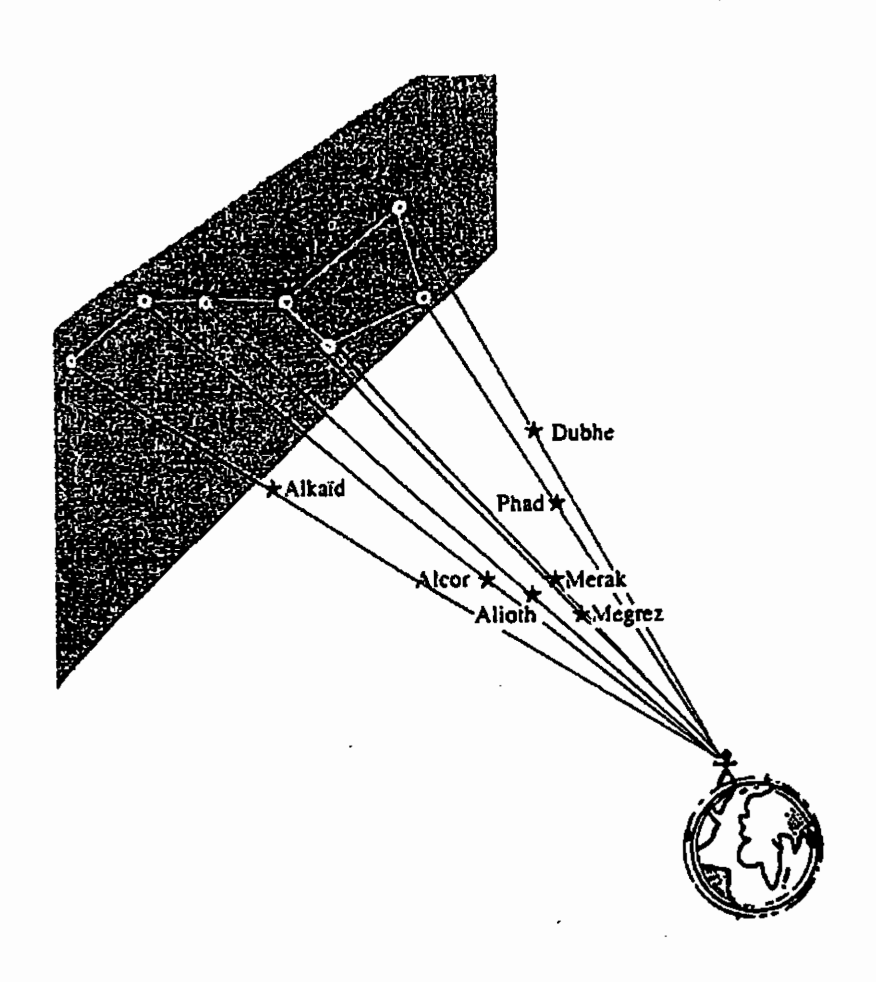
والبارامترات المهمة التى يجب قياسها، لفهم ماهية نجم ما، هى: طاقة الإشعاع التى يبثها النجم فى كل ثانية (أو قوة الإشعاع luminosite)، درجة حرارته السطحية، وتركيبه الكيميائى، وكتلته، إذا أمكن (التى يمكن الحصول عليها فقط فى حالة النجوم المزدوجة، أى نجمين يدوران معًا حول مركز جاذبيتهما).

لتحديد قوة إشعاع نجم ما بطريقة مباشرة، من الضرورى معرفة مسافته. وفى الواقع فإنه لو كان من السهل نسبيًا قياس طاقة الإشعاع التى تستقبلها الأرض من النجم، فإن معرفة مسافته الحقيقية هى التى تتيح استنتاج الطاقة التى انبعثت من المصدر. فكيف يتم قياس مسافة نجم؟ كيف يمكن مسح رحابة الفضاء اللانهائية؟ التقنية الأساسية سهلة تمامًا: وهى الطريقة التى نستخدم فيها عيوننا لملاحظة المعالم الواضحة. ويتعلق الأمر برصد الجرم نفسه من جهتين مختلفتين، تبتعدان بمسافة يطلق عليها "قاعدة التثليث"[٨]. ويعطى الاختلاف الزاوى بين اتجاهى الرصد مسافة الجرم. ولكى نحصل بهذه الطريقة على مسافة النجوم الأكثر قربًا منا، يحتاج الأمر إلى قاعدة تثليث كبيرة جدًا: لا تكفى كل الأرض لذلك، ومن ثم فإننا نستخدم حقيقة أنها تدور حول الشمس ونقيس التغير الصغير جدًا فى اتجاه النجوم خلال عام. وهذه الطريقة، المعروفة منذ زمن بعيد والتى وصلت مؤخرًا إلى نتائج جيدة جدًا بفضل القمر الصناعى هيباركوس Hepparcos، لا تناسب سوى النجوم الأكثر قربًا منا. وبالنسبة للنجوم الأخرى يجب استخدام طرائق إحصائية أكثر تعقيدًا إلى درجة أننا لن نقدمها بالتفصيل هنا.

ويوضح الشكل ١ إلى أى بعد عنا توجد النجوم الأكثر سطوعًا كل على حدة فى كوكبة الدب الأكبرgrand ourse. ويتم قياس هذه المسافات عادة بالسنة الضوئية، أو المسافة التى يقطعها الضوء فى سنة (وهى عشرة آلاف مليار كيلومتر). هذا هو مستوى طول المسافة بين نجوم مجرتنا. ويوجد النجم الأقرب إلينا، وهو الأقرب القنطورى Proxima Centaure، على بعد أربع سنوات ضوئية. وفى الدب الأكبر تقع النجوم ما بين ٥٠ و ١٥٠ سنة ضوئية تقريبًا.

---

(٨) التثليث triangulation: أحد الأوضاع النسبية للأرض والكواكب مع الشمس. (المترجم)



الشكل (١)

المقارنة بين مسافات النجوم فى الدب الأكبر، ويوجد المفرز Megrez على مسافة ٥٠ سنة ضوئية تقريبًا، والقائدة (أو قائد بنات نعش) Alkaid على مسافة ١٥٠ سنة ضوئية.

التحليل الطيفى: درجة الحرارة، التركيب، السرعة

يتم تحديد درجة الحرارة السطحية لنجم انطلاقًا من لونه: النجـوم الأكثـر سخونة تكون زرقاء (درجة الحرارة السطحية تصل إلى ٢٠٠٠٠ كلفن) والأكثـر برودة تكون حمراء (درجة الحرارة تصل إلى ٣٠٠٠ كلفن). والشمس فى المتوسط درجة حرارتها ٥٨٠٠ كلفن.

ومن الصعب غالبًا على الراصد غير المدرَّب أن يتعرف على لون النجوم؛ لأنه تحت شدة ضوئية محددة، لا تصبح العين البشرية قادرة على ملاحظة الألوان الشديدة: تميزها العين فقط كانعكاس مبهم فى وميض شعاع ضارب إلى البيـاض بشكل خاص. ومع ذلك فإن الألوان حقيقية!

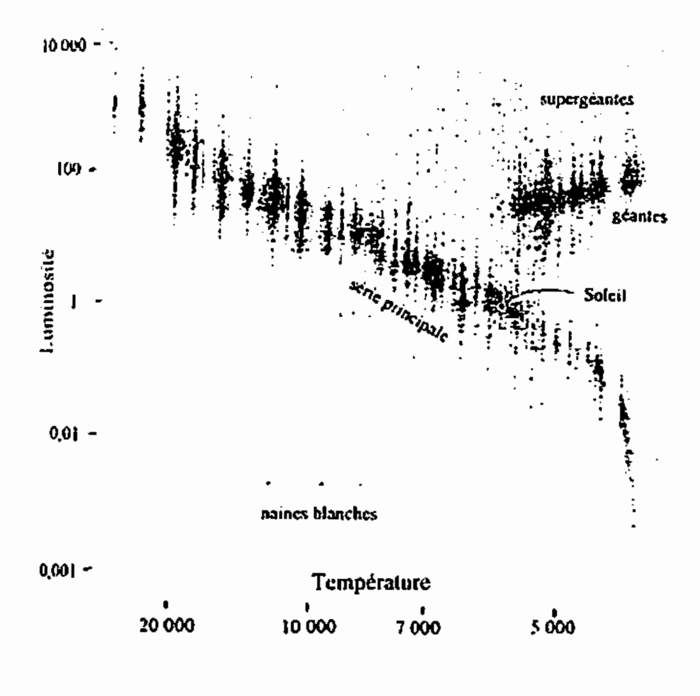
ويستخدم علماء الفلك تقنيات معدة إعدادًا جيدًا لحـساب درجـات حـرارة النجوم بدقة. والكل يعتمد على دراسة "الطيف" أو قوس قزح النجوم، أى التحليـل بترددات (أو بأطوال الموجة) الإشعاع المنبعث. وينتج قوس قزح الذى تراه العـين المجردة من تحلل الضوء الشمسى فى كل أطوال موجاته: وينتج ذلك بشكل طبيعى من تشتت الشعاع فى قطرات الماء المعلقة فى الهواء المحـيط. ونحـصل علـى النتيجة نفسها، أكثر دقة وأكثر تفصيلاً، باستخدام منشور أو شبكة مشتتة للضوء أو بؤرة تلسكوب. عندئذ نكتشف أن هناك الآلاف من "الألوان الغائبة": شعاع الـشمس والنجوم يتم امتصاصه على أطول موجات بالغة الدقة بواسطة الذرات الموجـودة فى المناطق الخارجية للنجوم، وهو ما ينتج عنه خطوط قاتمة فى الطيف.

وهكذا تعطينا الدراسة التفصيلية للأطياف النجمية مدخلاً، ليس فقـط إلـى درجة الحرارة، ولكن أيضًا إلى التركيب الكيميائى للنجوم. فالشمس مثلاً يوجد فـى طيفها توقيعات كل العناصر الكيميائية التى تتكون منها المادة التى تحيط بنا والتـى تتكون منها أجسادنا نفسها: وهذا مما لا شـك فيـه، حيـث إن الـشمس والأرض والكواكب الأخرى قد تكونت انطلاقًا من السحابة الهائلة من الغاز المجرى نفسها!

يمكن الحصول على معلومات أخرى مهمة انطلاقًا من الأطياف النجمية، وخاصة سرعة انتقال النجوم بالنسبة إلينا (كل شيء يتحرك فى الفضاء!) ودورانها حول نفسها (الكل يدور!). وتعتمد هذه الدراسات على "ظاهرة دوبلر effet Doppler": إذا اقترب جسم تنبعث منه موجة ضوئية فإن طول الموجة ينضغط ويبدو الضوء أكثر "زرقة"، وإذا كان الأمر بالعكس والجسم يبتعد فإنه يبدو أكثر "احمرارًا".

وفى الواقع لا يكون قوس قزح النجوم محدودًا بالألوان المرئية للعين: فبعد البنفسجى يحتوى على فوق البنفسجى، والأشعة السينية وأشعة جاما، ودون الأحمر هناك الأشعة تحت الحمراء والأشعة الراديوية الكهربائية (وتتضمن الموجات الميكرو). ومنذ قدوم الغزو الفضائى من الممكن رصد شعاع النجوم فيما بعد الضوء المرئى، عند ترددات يكون فيها ممتصًا بواسطة الغلاف الجوى للأرض: وقادت هذه الأرصاد إلى حصيلة من الاكتشافات الجديدة. مثال لذلك فإن النجوم المحاطة بإكليل مثل الشمس تنبعث منها أشعة سينية لا توجد لدى النجوم الأخرى، أو أيضًا تلك المحاطة بقرص من الغبار ينبعث منها أشعة تحت حمراء مميزة.

وقاد القياس المتزامن لقوة إشعاع ودرجة حرارة النجوم علماء الفلك إلى تخطيط رسم بيانى أساسى يطلق عليه "شكل اللون وقوة الإشعاع diagramme couleur - luminosite"، وأيضًا "شكل هرتز سبرنج رسل - Hertsprung Russel"، على اسم رائدين من رواد هذا التصنيف (الذى تم إنجازه للمرة الأولى فى ١٩١٠). وأدت دراسة هذا الشكل، مع الحسابات الأساسية للتطور النجمى، إلى فهم دقيق لماهية النجوم (شكل ٢).



الشكل (٢)

يمثل هذا الشكل قوة الإشعاع (بالنسبة لقوة الإشعاع الشمسية) بالنسبة إلى درجة الحرارة السطحية (بالدرجات) لعدد ٦٧٠٠ نجم الأكثر قربًا من الشمس.

ويتم الحصول على درجة الحرارة انطلاقًا من لون النجوم.

وتزداد قوة الإشعاع من اليمين إلى اليسار، تبعًا لتقليد راسخ لدى علماء الفلك!

ويُلاحظ أن الشكل الذى يطلق عليه "التسلسل الرئيسى"، المجموعة العملاقة لنجوم السوبرنوفا فى الأعلى يمينًا، وبضعة أقزام بيض فى الاتجاه السفلى. ونجوم التسلسل الرئيسى فى طريقها لأن تحرق الهيدروجين إلى هليوم. والأكثر ضخامة تكون متوازنة مع قوة إشعاع ودرجات حرارة أكثر ارتفاعًا: ولذلك فإنها تقع أبعد على الشمال فى الشكل.

وعندما ينتهى الهيدروجين القابل للاحتراق تصبح النجوم عملاقة.

ما النجم ؟

النجم هو "كرة ذاتية الانجذاب"، أى كرة هائلة من الغاز الساخن فـــى حالـــة توازن تحت تأثير ثقلها الخاص. وللشمس، وهى نجم متوسط نموذجى، كتلة ٢,١٠ ^{٣٠} كجم، أى مليار مليار مليار طن، وهو ما يناظر ٣٣٣٠٠٠ مرة كتلـــة الأرض. ونصف قطرها ٧٠٠٠٠٠ كم، أى مائة مرة تقريبًا نصف قطر الأرض. وللنجـــوم الأخرى كتلاً ما بين ٠,٠١ و ١٠٠ كتلة شمسية تقريبًا وأنصاف أقطارها قد تختلف تمامًا تبعًا لمرحلة تطورها: وهى نمطيًا ما بين عُشر وأكثر من ألف نـــصف قطـــر شمسى، من الأقزام حتى السوبرنوفا.

التوازن النجمى

إذا استقرت أقدامنا على الأرض دون أن نطير فى الهواء، فإن ذلك بـــسبب أثقالنا؛ لأن جسمنا منجذب بالكتلة الضخمة للأرض التى تمسك به. ولا نسقط فـــى مركز الأرض لأن التربة الصلبة تمنعنا من ذلك. ولكن عندما نسير فى الوحـــل أو فى رمال متحركة فإننا ننغرز بشكل لا مهرب منه. فلنتخيـــل ذرة علـــى الـــسطح الخارجى لنجم. تكون الذرة منجذبة نحو الداخل، وليس هناك تربـــة صـــلبة لكـــى تحجزها. لكنها خلال سقوطها تتعرض لاصطدام مع الذرات الأخرى التى تبطـــئ من سقوطها أكثر فأكثر على قدر هبوطها. وفى النهاية تتعرض لتأثير مـــن نـــوع "بزرة البطيخ": لأن الصدمات أكثر تأثيرًا بكثير فى العمق مقارنة بها فى الاتجـــاه الخارجى (لأن الضغط والكثافة ودرجة الحرارة أكثر ارتفاعًا)، يُعاد طردها نحـــو السطح. وهذا ما يُطلق عليه "الاتزان الهيدروستاتيكى"[٩]. وهكذا يكون النجم كلـــه متوازن تحت هذا التأثير، من جانب بسبب ثقل ذراته التى تميل إلى التركز، ومـــن جانب آخر بسبب قوى الضغط الداخلى التى تحافظ عليه فى معايير التوازن هذه.

---

(٩) هيدروستاتيكا hydrostatique: علم توازن السوائل أو الموائع وضغطها، ويخـــتص بدراســـة توزيـــع ضغط المائع والقوى المؤثرة على الأجسام المغمورة فيه بحيث يكـــون المـــائع فـــى حالـــة ســـكون. (المترجم)

وأيضًا يجب على النجم أن يكون لديه الطاقة الكافية لكي يحافظ علـــى هـــذا التوازن زمنًا طويلاً. وفى الواقع حيث إنه يتكون من غاز ساخن، فإنه يشع ويفقـــد طاقة يجب تعويضها من الداخل. ونعرف فى الوقت الراهن أن هذه الطاقـــة تـــأتى بشكل أساسى من التفاعلات النووية الناتجة فى أجزائه المركزيـــة. وفـــى الوقـــت الحالى يتم، داخل الشمس، تحول ٥٦٤ مليون طن من الهيدروجين كل ثانيـــة إلـــى هليوم. وحيث إن نواة الهليوم لها كتلة أكثر ضعفًا بكثير من نظيرها فى أربع نوى هيدروجين، التى تتكون منها نواة الهليوم، فإن الفرق يتحول إلى طاقة تبعًا للصيغة الكلاسيكية لأنشتين: $E = mc^2$ (الطاقة = الكتلة فى مربع سرعة الضوء). لذلك فإن ٥٦٠ مليون طن من الهليوم "فقط" هى التى يتم إنتاجها، ويتحول ٤ ملايين طن فى الثانية إلى أربعمائة مليون مليار كيلووات (٤,١٠ ^٢٦^ وات). وتنتقل هذه الطاقة بعد ذلك نحو الخارج: وهذه هى قوة الإشعاع الشمسية. وهكذا يمكن حساب مدة حيـــاة الشمس، وهو ١٠ مليارات من السنوات، وعمرها الراهن: ٤,٥ مليار سنة.

من أين تأتى النجوم؟

عندما ننظر بإعجاب إلى القبة السماوية فى ليلة صيف صحوة فإننـــا نميـــز بسهولة هذا الشريط الضارب إلى البياض الذى يعبر الفضاء كله: درب اللبّانة. هذه هى مجرتنا: مائتا مليار نجم التى تمثل الشمس واحدًا منها، قرص عمـــلاق قطـــره ١٠٠٠٠٠ سنة ضوئية وموقعنا فى قلبه. ويشير الفحص الدقيق إلى أن درب اللبّانة غير متناسق: فهو يبدو كمجموعة من البقع المضيئة تتخللها مناطق معتمة. ويوجد فى الواقع كميات ضخمة من الغاز المنتشر مبعثرًا بين النجـــوم: "مـــادة مـــا بـــين النجوم"، مركّزة غالبًا فى "سدم". ويحتوى هذا الغاز على ذرات، وجزيئات (معقـــدة جدًا أحيانًا)، وحبيبات غبار. ويخضع لظواهر عنيفة: موجات صدمة قادمـــة مـــن انفجارات النجوم، وحركات من شتى الأنواع ترتبط بدوران المجرة، من الموجات التى تعبرها ومن التصادمات المختلفة. وعندما تكون كتلة غاز، بالصدفة، مركّـــزة بما يكفى فقد تنهار تحت تأثير ثقلها الخاص وتصبح "نجمًا مبكرًا proto - etoile".

ولقد أتاح تلسكوب الفضاء هابل أن يرصد، بشكل خاص فى سديم الجبار، الكثيـــر من أجنة النجوم هذه.

وقد تكون الظروف التى أدت إلى تكوّن نجوم جديدة متنوعة تمامًا: ولـــسبب أو لآخر يجب أن يكون غاز ما بين النجوم مضغوطًا أبعد من "نقطـــة اللاعــودة". ولذلك ندافع عن تكونات النجوم "بالتسلسل" فى المجرات الأخرى، وهو ما يطلـــق عليه بدقة "مجرات تنتفض بالنجوم" (انفجارات نجم). وقد ينجم ضغط الغاز أحيانًـــا حتى من تصادم مباشر بين مجرتين. وهذه حالة المجرة رائعة المنظر "درب عربة النقل roue de charrette" حيث يمكن تمييز دائرة لامعة هائلة تلتف حول مجـــرة مركزية تبدو عادية. وفى الحقيقة حدث تصادم مع مجرة أخرى مرئية بعيدة بعض الشىء، فانبعثت نواة غاز مضغوط تحول جزئيًا إلى نجوم.

وتوضح دراسة النجوم الأكثر شبابًا أن بعضها محاط بقرص مـــن الغبـــار، بينما تشبه أخرى "سحبًا". من ناحية أخرى يتكوّن أكثر من نصف النجوم كـــأزواج (النجوم المزدوجة) بل وحتى أحيانًا بالثلاثة أو أكثر!

وفى كل الحالات فإن النجم المبكر يستمر فى التكثّف مع انبعاث إشعاع كثيـــف (يكون نموذجيًا أكثر من ١٠ إلى ١٠٠ مرة من قوة الإشعاع الشمسى). ومـــع تكثّـــف هذا النجم فإنه يسخن وترتفع درجة حرارته المركزية حتى تصل إلى قيمة كافيـــة لأن تبدأ التفاعلات النووية لاندماج الهيدروجين إلى هليوم. عندئذ يستقر. وتـــستغرق فـــى مجموعها نحو ١٠ ملايين سنة، وهو ما قد يضاهى فترة الحياة الإجمالية للنجم.

وكل عمليات التكثيف لغاز ما بين النجوم لا تصل إلى الدرجة التى تجعلهـــا تصبح نجومًا حقيقية. وفى الواقع فإن الكرات الغازية ذات الكتلـــة التـــى تتجـــاوز ٠,٠١ كتلة شمسية هى فقط التى تصل إلى درجة حرارة كافية "لإشعال" التفاعلات النووية التى تتيح لها أن تستقر. وإذا كانت كتلتها أقل من ٠,٠٠١ كتلـــة شمـــسية، تصبح كواكب. وبين الطرفين تقع أجرام لا تكون لا نجومًـــا حقيقـــة ولا كواكبًـــا حقيقة: "الأقزام السمراء".

هناك أيضًا حدًا أقصى لكتلة النجوم: الكرات الغازية بالغة الضخامة تكون غير مستقرة ولا تصل إلى أن تتشكل، ويُقدر هذا الحد بنحو ١٠٠ كتلة شمسية.

التطور النجمى

تبعًا للكتلة الأولية للنجوم تستقر هذه النجوم بقوى إشعاع ودرجات حرارة متنوعة. والنجوم الأكثر ضخامة تكون أكثر سخونة وتبث إشعاعًا أعلى كثافة. وتفسر هذه النتيجة شكل "اللون – قوة الإشعاع" للنجوم المرصودة (الشكل ٢). ومثال لذلك فإن نجمًا ذا ١٠ كتل شمسية يستقر بقوة إشعاع ١٠٠٠ قوة إشعاع شمسية ودرجة حرارة سطحية ٢٠٠٠٠ كلفن: ويكون لونه أزرق.

ومن الواضح أنه ليس لدينا مدخلاً مباشرًا (إلا فى حالات استثنائية، تعتبر أكثر بعدًا) إلى داخل النجوم التى عرفناها عن طريق الدراسات النظرية. وقد نشير (وهذه هى نظرية فوت – راسل Vogt - Russel) إلى أن معرفة الكتلة والتركيب الكيميائى لنجم كافية لوصفه كاملاً، تبعًا لتطوره.

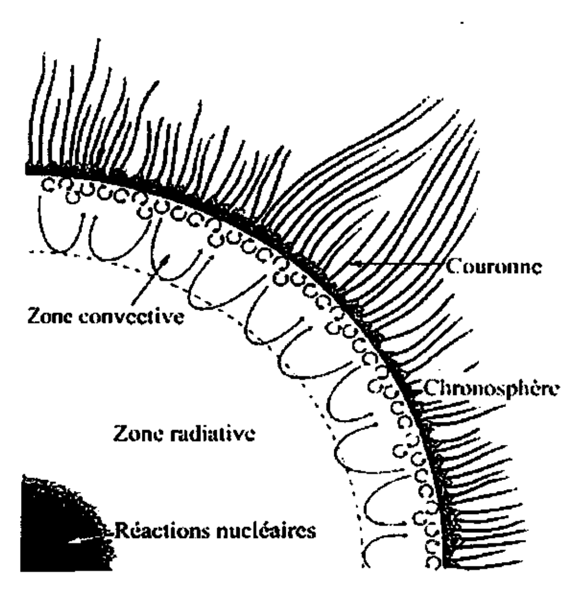
ويوضح الشكل ٣ ما فى داخل الشمس. فى المناطق المركزية (نحو ٢٠ فى المائة من نصف القطر) تحدث التفاعلات النووية. وفى المركز تكون درجة الحرارة ١٦ مليون درجة، والكثافة ١٥٠ جم لكل سنتيمتر مكعب (أى أكثر ١٠٠ مرة من كثافة الغلاف الجوى الأرضى فوق سطح الأرض) والضغط أكثر ٢٠٠ مليار مرة من ضغط الغلاف الجوى! وتنتشر الطاقة الناجمة عن التفاعلات النووية نحو السطح على هيئة فوتونات، التى لا يتوقف امتصاصها وإعادة بثها بواسطة الذرات التى تقابلها فى طريقها. ويحتاج الأمر إلى بضعة ملايين من السنوات حتى تصل الطاقة المنتجة فى مركز الشمس إلى السطح! وعند منتصف نصف القطر تصل الكثافة إلى قيمة كثافة الغلاف الجوى على الأرض، لكن الضغط يظل هناك عند ٦٠٠ مليون من كثافة الغلاف الجوى تقريبًا. وعند القسم من نصف القطر ٧٢ فى المائة تنتج ظاهرة خاصة: تشرع فقاعات غاز فى الصعود نحو السطح وتهبط

فقاعات أخرى، مثل الماء الذى يغلى فى إناء طبخ. ويتعلق الأمر بظاهرة انتقال الحرارة بالحمل، مثل تلك التى تحدث فى الهواء المحيط تحت منظومات التسخين التى يُطلق عليها "أجهزة الحمل". وفى الشمس تصل منطقة الحمل حتى السطح، حيث تظهر فى صور القرص الشمسى على هيئة "حبيبات" ضخمة فى حجم فرنسا.

ويشبه داخل النجوم الأخرى نظيره فى الشمس، مع بعض الاختلافات. وعندما تزداد الكتلة تصبح درجة الحرارة المركزية والكثافة والضغط أكثر ارتفاعًا أيضًا. ومنطقة الحمل السطحية أقل عمقًا، ولكن بالعكس يصبح قلب النجم نفسه حاملاً بالنسبة للكتل الأعلى من ١,٥ كتلة شمسية.

كل ما وصفناه توًا يتعلق بالنجوم المستقرة بفضل اندماج الهيدروجين إلى هليوم فى قلبها النووى. ما الذى يحدث عندما ينتهى الهيدروجين القابل للاشتعال؟ يتقلص مركز النجم وتبدأ درجة حرارته فى الارتفاع. وفى الوقت نفسه تتمدد المناطق الخارجية للنجم ويزداد نصف قطره بدرجة كبيرة. وفى النهاية يستقر كل شىء من جديد عندما تكون درجة الحرارة المركزية كافية لإشعال الاندماج النووى للهليوم إلى كربون. عندئذ يصبح النجم "عملاقًا أحمر". فيما بعد قد يتطور النجم من جديد ليصبح "عملاق فائق supergeante". وخلال عملية التطور هذه تتحول العناصر الكيميائية التى يتكون منها السديم البدائى حيث نتج النجم: الهيدروجين إلى هليوم، والهليوم إلى كربون، ثم نتروجين وأكسجين... إلخ. وتحدث أيضًا تفاعلات نووية تابعة أخرى، وخاصة تكون وامتصاص النوترونات التى تؤدى إلى تكوّن العناصر الثقيلة حتى الأورانيوم..

وثراء التفاصيل التى يعرفها علماء الفيزياء الفلكية طائلة ولا يكفى كتاب كامل لتقديمها!



الشكل (٣)

داخل الشمس. تحدث التفاعلات النووية في القلب، داخل منطقة تمتد إلى ٠,٢ من نصف قطر الشمس، أى نحو ١٤٠٠٠٠ كم. والفوتونات التى تتخلق بهذه الطريقة تنتشر ببطء نحو الخارج. وعند نصف قطر ٠,٧٢ من نصف قطر الشمس، أى نحو ٥٠٠٠٠٠ كم، تبدأ منطقة الحمل التى تخلط المادة حتى المناطق الخارجية. وفوقها يوجد الكروموسفير[١٠] والإكليل الشمسى، علامة الغاز شديد السخونة الذى يفلت من الشمس نحو الفضاء.

نهاية النجوم

تختلف مدة حياة النجوم أيضًا تبعًا لكتلتها: يكون لدى النجم الأكثر ضخامة "وقود نووى" أكثر، لكنه يفقد طاقة أكثر بكثير كل ثانية، والموازنة النهاية ليست فى صالحه. ولا يمكن لنجم له ١٠ كتل شمسية أن يوجد سوى خلال ١٠٠ مليون سنة، أى مدة تعتبر عشر مرات أقل من الشمس!

(١٠) الكروموسفير chromosphere: جو الشمس بين الإكليل والطبقة العاكسة. (المترجم)

كيف تختفى النجوم؟ هنا أيضًا يعتمد السيناريو على الكتلة. عندما تكون الشمس قد استنفدت كل وقودها، فى ٥ مليارات سنة، سوف تتضخم مناطقها الخارجية، ثم تتضخم.. حتى تصل إلى الكواكب المحيطة بها وتلتهمها، إلا إذا كان قد تم قذفها قبل ذلك إلى فضاء ما بين النجوم. وسوف يتبعثر كل هذا الغاز حينئذ على هيئة سديم رائع. وما سيبقى من قلب الشمس سيصبح نجمًا صغيرًا يطلق عليه "قزم أبيض"، بحجم يماثل الأرض، الذى سيبرد بهدوء (وسوف يحتاج ذلك إلى بضعة مليارات من السنوات) قبل أن يختفى عيانًا وهو يتبلور.

والنجم الأكثر ضخامة من الشمس (نحو ٦ إلى ٨ مرات، فالحد غير مؤكد) ينتهى وجوده بطريقة أخرى أكثر عنفًا: ينفجر! ويستغرق ذلك بضع ساعات فقط، وهو أمر نادر جدًا فى علم الفلك حيث مقاييس الزمن تكون هائلة بشكل عام مقارنة بمقياس الحياة البشرية. ويطلق على مثل هذا الانفجار النجمى "سوبرنوفا". وأكثر ما شاهدناه إثارة حديثًا هو السوبرنوفا 1987A فى "سحابة مجلان العظمى" (وهى مجرة قريبة منا، يمكن رؤيتها بالعين المجردة فى نصف الكرة الجنوبى). ولقد انفجر هذا النجم فى الواقع منذ ١٧٠٠٠٠ سنة قبل رؤيتنا له، حيث إن مسافة هذه المجرة هى ١٧٠٠٠٠ سنة ضوئية!

وعند انفجار سوبرنوفا تعبر داخل النجم موجة صدمة تؤدى إلى ارتفاع قاسٍ فى درجة الحرارة إلى مليار درجة: إنها قنبلة حقيقية تحول تمامًا التركيب الكيميائى للمادة وتؤدى إلى تصنيع عدد كبير من العناصر الثقيلة التى نعرفها على الأرض. وفى الواقع، فإن قياسات العناصر المشعة تشير إلى أن الشمس وحاشيتها من الكواكب تكونت، منذ ٤,٥ مليار سنة، فى منطقة من المجرة حيث وقع انفجار سوبرنوفا على أقل تقدير!

وفى مركز ما يتبقى من السوبرنوفا (وهو ما يبدو بعد الانفجار على هيئة سديم هائج) يوجد غالبًا نجم صغير جدًا، أكثر صغرًا أيضًا وأكثر كثافة من قزم أبيض، يطلق عليه "نجم نوترونى". ويمكن أن يكون لهذا النجم الصغير مجال

مغناطيسي شديد، يوجه الضوء إلى اتجاه محدد. وبالإضافة إلى ذلك فإن حزمة الضوء، التي تدور بسرعة، تكون أحيانًا مرئية بدقة عالية (إذا تم توجيهها بشكل صحيح)، وتبدو عندئذ مثل منارة سماوية: إنها نجم نابض (بلزار pulsar).

علم جديد: علم الزلازل الفلكية

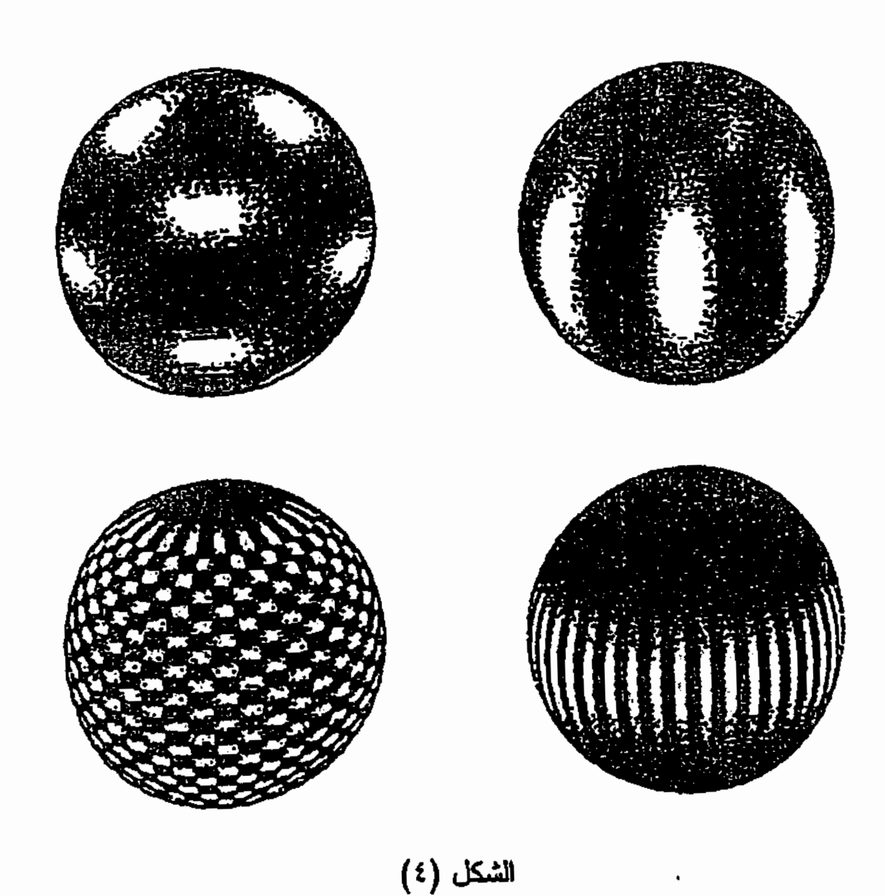
حصلت الدراسات النظرية عن داخل النجوم حديثًا على دعم مثير، بفضل علم الزلازل الشمسية heliosismologie، أو دراسة الذبذبات الشمسية.

تهتز الشمس مثل آلة موسيقية هائلة. وتتصرف هذه الكرة الغازية الضخمة مثل صندوق رنين يبدأ في الاهتزاز تحت تأثير صدمات غير متوقعة تحدث في مناطقه الخارجية. تنتشر موجات رنانة داخل الشمس (بسرعة أعلى نحو ألف مرة من سرعات الموجات الرنانة في الغلاف الجوى للأرض على مستوى السطح) ثم تنعكس نحو الخارج. ويتم كشف تأثيراتها بالحركات الصغيرة للسطح الذى تسببه (الشكلان ٤ و٥). وبفضل ظاهرة دوبلر، التى تكلمنا عنها سابقًا، تتم ملاحظة هذه الحركات الصغيرة وتحليلها. وفترات ذبذبتها تكون نموذجيًا بمقدار ٥ دقائق.

ولدراسة الاهتزازات الشمسية يجب أن يكون فى استطاعتنا رصد الشمس عدة أيام متصلة معًا. ولهذا الغرض هناك ثلاثة احتمالات متاحة:

- الرصد من المنطقتين القطبيتين حيث لا تغيب الشمس خلال عدة أشهر.
- إرسال أجهزة إلى الفضاء.
- إنشاء شبكات رصد على الأرض بحيث تستطيع شبكة أكثر بعدًا إلى الشرق؛ حيث إن الشمس تغيب عن أحد المراصد، أن تحل محل هذا المرصد بطريقة تنسيقية.

ولقد تم استخدام الطرائق الثلاث الممكنة: وتم الحصول على أول أرصاد للذبذبات

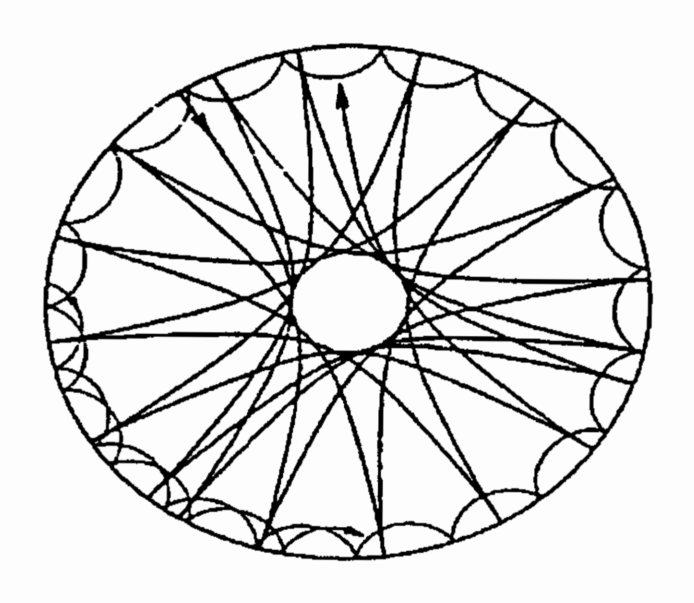


الشكل (٤)

أمثلة محتملة لاهتزازات النجوم:

تتقارب المناطق المضيئة وتتباعد المظلمة؛ لكي تنعكس بعد عدة دقائق،

وتم الكشف عن عدة آلاف من الأنواع متناسقة مع هذا النوع.



الشكل (٥)

انتشار موجات الرنين داخل نجم.
تخترق الموجات نحو الداخل مع انحنائها، ثم تنعكس على السطح
عند نقاط تناظر الاهتزازات التي تم رصدها.

الشمسية فى القطب الجنوبى نحو عام ١٩٨٠. ومن جانب آخر تـم إنـشاء شبكات رصد حول الكرة الأرضية كلها، والأكثر أهمية بينها هى الـشبكة GONG (اختصارًا لمجموعة شبكة الذبذبات الأرضـية Global Oscillations Network Group) والتى تتضمن ستة أجهزة متماثلة وُضعت فى هاواى، وفى شيلى، وفـى الولايات المتحدة، وفى جزر الكانارى، وفى الهند وأستراليا. وفى النهاية أتاح القمر الصناعى سوهو SOHO، بفضل الكثير من الأجهزة الموجـودة عليـه، دراسـة مجموعة هذه الاهتزازات بطريقة بالغة الدقة.

وأدت هذه الأرصاد إلى ظهور علم جديد: علم الزلازل الشمسية، أو علم زلازل الشمس sismologie du soleil. وتتيح دراسة موجات الرنين هذه في الواقع معرفة دقيقة بما في داخل نجمنا، كما هو الحال في دراسة ارتداد الموجات الزلزالية الناجمة عن الهزات الأرضية التي تتيح لعلماء الطبيعيات الأرضية اكتشاف تركيب المناطق الداخلية لكوكبنا.

وكما هو حال كل صناديق الرنين، تهتز الشمس بترددات تحتوي على عدد كبير جدًا من التناغمات. وحيث إن "الصندوق" كروي فإن دراسة هذه التناغمات معقدة جدًا، بالأحرى بضعة آلاف! لكن العديد من علماء الفيزياء الفلكية يعملون في هذا المجال، وفي استطاعتهم في الوقت الحالي أن يستنتجوا منه البنية الداخلية للشمس إلى دقة تصل إلى واحد في الألف تقريبًا.

وعندما نقارن نتائج علم الزلازل الشمسية بالدراسات النظرية المعروفة سابقًا، فإن التوافق يكون مدهشًا. ومع ذلك هناك اختلافات صغيرة من المثير بحثها؛ لأنها أتاحت فيما مضى أيضًا تحسين الدراسة الفيزيائية لتلك البيئات المتطرفة، الأكثر سخونة وكثافة بكثير من كل ما يمكننا إنتاجه على الأرض.

ويتمثل الطموح في العقد المقبل في قياس تذبذبات النجوم كما تمكننا في الوقت الراهن من قياس الذبذبات الشمسية. ومن أجل ذلك يجب أن نرسل في الفضاء أقمارًا صناعية بالأجهزة الملائمة. والمشروع الذي تشرف عليه فرنسا: القمر الصناعي كورو COROT من المفترض إطلاقه إلى مداره خلال العقد المقبل، بالهدف المزدوج المتمثل في قياس الذبذبات النجمية والكشف عن كواكب خارجية exoplanetes. وهو مشروع مهيب، في مقدمة علم الفيزياء الفلكية العالمي، يتيح اكتشافات جديدة مثيرة!

ومن الأمور الخلابة أن نقف، مع انحسار قرن، على كل ما نجح الباحثون في معرفته عن هذه الأجرام السماوية ألا وهي النجوم، وكل ما تبقى لنا أيضًا أن نعرفه. النجوم هي محرك تطور الكون: فهي التي، في جوفها النووي، تحولت

المادة خلال الزمن. ولولا أنه كانت هناك نجوم نجمنا في المجـرة، وبـشكل خاص نجوم السوبرنوفا، لما كانت العناصر الكيميائية التي يتكـون منهـا عالمنـا الراهن قد تكونت في الوقت المحدد لتكون جزء من السديم الذي خرجنا منـه. لـم يكن في استطاعتنا ببساطة أن نوجد الآن على الأرض!

كواكب خارج المجموعة الشمسية[11]

بقلم: ألفريد فيدال-مادجار

Alfred VIDAL - MADJAR

ترجمة: عزت عامر

عوالم مأهولة بالآلاف أو حتى بالمليارات فى مجرتنا، لما لا؟ وحول احتياج الأمر أيضًا إلى اكتشاف منظومات كوكبية أخرى: فهذا شيء تم إنجازه فى الوقت الراهن!

كانت هذه الفكرة حول تعدد العوالم محل مناقشة منذ زمن طويل جدًا بين علماء الفلك وعلماء اللاهوت والفلاسفة والكتاب وآخرين فى العديد من المجتمعات البشرية. وبشكل خاص نظل هائمين أمام نتائج الحدس العبقرية للفلاسفة الإغريق عندما نعرف ماذا كانت عليه حالة معارفهم الواقعية فى علم الفلك. مثال لذلك أن طاليس Thales كان يرى فيما سبق أن النجوم صُنعت من مادة تشبه تلك الموجودة على الأرض. ثم خلال أكثر من ألف عام، كان على الدين المسيحى أن يضع الأرض تبعًا لبطليموس Ptolemee فى مركز الكون لكى تتوقف بذلك كل المناقشات. ومع كوبرنيكس Copernic الذى أعاد بعث تلك الأبحاث لم تعد الأرض سوى "أرض" من بين نظائر أخرى. وحدث أن تدعمت هذه الحجة بواسطة الرصد المباشر الذى أصبح ممكنًا بفضل اختراع المنظار الفلكى بواسطة جاليليو Galilee.

وتفتح عصر جديد لعلم الفلك. عندئذ تصاعد الجدل ليشهد مسارات غير معقولة أحيانًا، خاصة مع غياب الرصد. ومن بينها، ما كان عصيبًا، وهو ما أحدث فى حينه اضطرابات واسعة مثل اكتشاف قنوات على المريخ فى نهاية القرن

---

(11) نص المحاضرة رقم ١٩٤ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٢ يوليو ٢٠٠٠.

السابق بواسطة شياباريلى Schiaparelli. وكان التطور فى هذا المجال بالغ البطء؛ لأن كثرة النظريات نادرًا ما كان يتم إثباتها بواسطة الرصد المباشـــر. وأدت هـــذه المواجهة رغم الظروف التى لا محيص عنها إلى أقصى تقدم علمى حقيقى.

ومع أن خطوات تقدم بارزة فى فهم آليات ظهور الحيـــاة فـــى الكـــون تـــم إنجازها خلال العقدين الماضيين، فإن الدراسة حول الحضارات المحتمل وجودهـــا خارج الأرض ظلت، فى حد ذاتها، مجرد تأملات، حتى نشر مقالة تطورية حقًا فى ســـبتمبر ١٩٥٩ بواســـطة جيوســـيب كوتـــشونى Giuseppe Cocconi وفيليـــب موريسون Philip Morrison.

فقد قلبا المناقشة حول تعدد العوالم من نطاق المناقشة الأكاديمية تمامًا إلـــى نطاق المواجهة العلمية. وكان من الممكن فى الواقع اختبـــار أفكارهمـــا مباشـــرة بالرصد. ولقد تنبأ بأنه، مع أخذ معارفنا فى الفيزياء الفلكية فـــى الاعتبـــار، مـــن المنطقى أن نقول بأن أشكال الحياة المشابهة لحياتنا قد تكون ظهرت فى مكان آخر فى الكون. ومع ملاحظة أنه بفضل تطور تقنيات حضارتنا كان من الممكـــن بـــث واستقبال إشارات من مسافات شاسعة، فإنه من المحتمل أن حضارة أخرى تمكنت من السير على الطريق نفسه قادرة على الاتصال بنا. وكانت المسألة عندئـــذ هـــى تطوير فرصهم فى الوجود وما إذا كان، بالتالى، هذا الاحتمال كبيـــر، يمكنـــه أن يحدد الطريقة المنطقية المناسبة أكثر من غيرهـــا للاتـــصال. واقترحـــا اســـتخدام الإشعاع الراديوى بطول موجة لابد أن تكون معروفة لكل سكان العالم والتى توجد فى نطاق طيفى حيث ضوضاء تشويش العمق المجرى منخفض بشكل خاص: خط الطيف على بعد ٢١ سنتيمتر من خط الهيدروجين، العنصر الأكثر بساطة والأكثر غزارة فى الكون.

وأطلقت هذه المقالة سلسلة كاملة من النقاشات وأبـــرزت مـــشروع أوزمـــا Ozma الذى أطلقه فرانك دراك Frank Drake، الذى تمنى من خلاله الكشف عن إشارة "ذكية" قادمة من نجوم قريبة، على طول هذه الموجة ٢١ ســـنتيمتر. وبعـــد

نتيجة أولى سالبة، أسس الاجتماع الشهير جرين بانك Green Bank فــي ١٩٦١، الذى من خلاله تمت إعادة النظر فى الأدلة الأصلية. وبشكل خاص كانــت هنــاك نقطة مهمة تمت مناقشتها: هل يمكن التقييم الدقيق لاحتمــال وجــود مثــل هــذه الحضارة؟ وفى الواقع، لو كان هذا الاحتمال ضعيف بدرجة كبيرة، فمن الواضـــح أن هذا البحث سيكون بلا جدوى.

وألمح فرانك دراك إلى أنه من المحتمل أن عدد N من الحضارات القــادرة على الاتصال فى المجرة كان ناتجًا عن العوامل التالية:

– عدد النجوم E التى تولد كل سنة فى مجرتنا، والجزء من النجوم f_p الذى تحيط به حاشية من الكواكب، والعدد n_l للكواكب الموجودة فى ظــروف مــشابهة لتلك التى توجد فيها الأرض، والجزء f_v الذى فيه ظهرت الحياة، والجزء f_i الــذى تطورت فيه الحياة إلى الذكاء، بين تلك المجتمعــات الذكيــة، والجــزء f_c لتلــك المجتمعات التى ستتصل وفى النهاية الزمن T الذى ســيتم خلالــه إنجــاز هــذا الاتصال.

غير أنه من الواضح الآن أن هذا المدخل لن يسمح على أى حال بحــساب احتمال معطى بأن الرقم الصحيح للعوامل الداخلة فى الاعتبار مجهول. ومع ذلــك فإن هذه العوامل ستفيدنا كدليل فى غرضنا، لكن علينا ألا ننسى أبدًا أن الكثير مــن بينها، تلك الخفية، قد يلعب دورًا. وفى الوقت الراهن فإن جهلنا هــو فقــط الــذى يمنعنا من تقديمها؛ لذلك فإن هذا المسعى، كما يقال، هو ما يمكن أن نفعله عندما لا نعرف شيئًا. وله على الأقل فضيلة أنه يسترعى الانتباه إلى عناصر المناقشة التــى قد تكون مهمة، وكانت التقديرات الأولية لهذه العوامل كما يلى:

– E لها القيمة ١٠ نجوم جديدة سنويًا (وهى كمية مقدارها بسيط جدًا وناتج عــن تقدير عدد نجوم المجرة، ١٥٠ مليار، مقسوم على عمر مجرتنا الذى يصل إلى نحو ١٥ مليار سنة. لذلك فمجرتنا يجب أن تصنع فــى المتوســط ١٠ نجــوم جديدة سنويًا لكى تصل إلى ١٥٠ مليار الموجودة حاليًا).

- f_p يبدو أن نظريات تكوّن النجوم تشير إلى أن السديم البدائى خلال تكثفه لابد أنه كوّن قرصًا من المحتمل جدًا أن الكواكب وُلدت فى قلبه. وبالتالى فإن f_p قد يكون مهمًا حيث إنها العملية نفسها التى أدت إلى ميلاد النجم وحاشيته من الكواكب فى قلب السديم البدائى خلال تكوّن القرص. وقد تكون القيمة المتفائلة هى ٠,٢؛ لأنه فى منظومات الكواكب المتعددة (المتكررة أكثر من غيرها حيث إن ٧٠ فى المائة من النجوم تمثل جزءًا منها) يبدو من الصعب تصور أن يستمر مثل هذا القرص موجودًا؛ ومع ذلك من الممكن أيضًا تمامًا أن هذه الأقراص اختفت فى زمن مبكر جدًا بعد تكوّن نجم وأن القليل جدًا من الكواكب وجدت بالفعل حول نجوم أخرى، إذا كان f_p ذو قيمة طفيفة.

- n_t يبدو من المقبول التفكير فى أنه من بين حاشية الكواكب كان هناك دائمًا إحداها، على بعد قريب بعض الشىء من النجم، ومن النوع الأرضى (فى حالة المجموعة الشمسية كان لابد أن نجد الزهرة والمريخ إضافة إلى الأرض)، ومن المحتمل أن n_t لها القيمة ١.

- f_v الجزء من الكواكب التى كانت فى مواقع مناسبة لأن تظهر عليها الحياة قد يكون أيضًا ١؛ لأنه ليس هناك ما يعتبر استثنائيا على ما يبدو قد حدث على الأرض منذ نشأتها.

- f_i بمجرد ظهور الحياة فإن آليات الانتخاب تبدو حتمية لظهور الذكاء، f_i = ١.

- f_c يبدو أن الجزء من الحضارات الذكية القادرة على الاتصال يكون مرتبطًا بالتطور التقنى الذى يكون ممكنًا هو الآخر بما فيه الكفاية، مما يجعل قيمة f_c بالمقدار ٠,٢.

- T يمثل الفترة الزمنية للحياة لمثل هذه الحضارة وبشكل خاص الفترة الزمنية لجهدها فى الاتصال، ومن الواضح أن كل التقديرات محفوفة بالمخاطر، وتتنبأ التقديرات الأكثر تشاؤمًا بنحو مائة سنة للزمن الفاصل بين مستويات التقدم التقنى العلمى عن النهاية المنهجية لمثل هذه الحضارات بالتدمير الذاتى

(التقنى)، والأكثر تفاؤلاً ترد بأن عمليات التقدم هـذه تعطـى بـالعكس لهـذه الحضارات فرصة البقاء حتى تستطيع أن تستمر "إلى أجل غير محدد"، والقيمة المحددة "المعقولة" ستكون مليار سنة، القيمة المقدرة لاستمرار حياة كوكب.

ونتحقق فورًا من أن العامل المهم بل حتى الحاسم فى هذا التقدير هو بشكل واضح العامل الأكثر اتصافًا بأن معرفتنا به سيئة، وهو T. كذلك يقدر المتفـائلون N ببضع مئات الملايين من الحضارات القادرة على الاتصال فى الوقت الراهن فى المجرة ($N = 10 \times 0.2 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0.2 \times 10^9$)، فـى حـين أن المتـشائمين يقدرون هذا الرقم بنحو مائة وحتى فى الوقت الراهن ببضع وحدات، بالأخـذ فـى الاعتبار بشكل خاص أن المنظومات الكوكبية تعتبر نـادرة تمامًـا وأن العوامـل الأخرى يجب إنقاصها هى أيضًا. ويبدو أن هذا الأمر يشير مع ذلك إلى أنـه مـن المقبول تمامًا أن هناك حضارات أخرى موجودة وأن بحثها من الممكن أنه قد تكلل بالنجاح. ومع ذلك فإنه من الممكن أيضًا أن عددنا قد يكون قليل جدًا فى المجـرة. وفى النهاية فإن الأمور التى نعرفها قليلة جدًا. ورغم هذه الشكوك ووجـود هـذه المجازفات فإن هذا البحث قد تعزز.

ومع ذلك استمرت النتائج سلبية بشكل يتسم بالصرامة، وتمت إعادة النظـر فى العوامل المختلفة. وسوف نقدم هنا تطور الأفكار حول هذا الموضوع، التطـور الذى يكشف عن خطوات تقدم ملحوظة جرت فى الخمس سنوات الأخيرة بفـضل الرصد المباشر لميلاد نجوم واكتشافات حديثة لكواكب خارج المجموعة الشمسية.

ويعتبر معدل تكوّن النجوم أكثر "ضآلة" من التقدير الأولى ويجب أن يكـون بالأحرى نجمًا واحدًا فى العام فى المجرة ($E = 1$).

والجزء f_p. من النجوم التى يمكن أن يكون لها كواكب، "يزداد" بالأحرى وقد يكـون ذلـك بقيمـة ٠,٥؛ لأنـه بعـد اكتـشاف أقـراص الكواكـب المبكـرة protoplanetaires وأقراص ما بعد الكواكب postplanetaires، كـان قـد سـبق إحصاء أكثر من ٦٠ كوكبًا جديدًا حول نجوم أخرى. والأول من بينها عُثر عليـه

فى مدار حول ٥١ الفرس الأعظم 51 Pegase بواسطة ميشيل مايور Michel Mayor وديديه كيلوز Didier Queloz، فى ١٩٩٥.

وتدخر لنا هذه الكواكب فى الواقع الكثير من المفاجآت المهمة التى تدفعنا فى الوقت الراهن إلى مراجعة f_p لرفعه:

- تكون مرة على هيئة زوج حول نجوم مزدوجة أو متعددة، مما يتيح لنا تصور منظومات كوكبية حول أغلب كواكب المجرة.
- هذه الكواكب العملاقة المكتشفة غالبًا ما تكون أكثر قربًا بكثير من نجمها مقارنة بعطارد الشمس، مع أن ذلك غير متوقع، ومن الواضح أن هذه النتيجة ترجع إلى طريقة الرصد المستخدمة، وهى محسوسة أكثر بكثير بالنسبة للكواكب الأكثر ضخامة والأكثر قربًا من نجمها.
- جزء مهم من هذه الكواكب على مدارات إهليلجية إلى درجة كبيرة بعكس تلك الموجودة فى مجموعتنا الشمسية.
- واحد منها منجذب حول نجم ذى كتلة صغيرة (٠,٣ كتلة شمسية)، وتمثل هذه النجوم، وإلى حد بعيد، أغلبية نجوم مجرتنا (٨٠ فى المائة)، وهكذا، حتى لو لم نضع فى اعتبارنا سوى النجوم البسيطة على اعتبار أنها مناسبة لإيواء الحياة، فمن المحتمل وجود كواكب حول جزء مهم من النجوم فى المجرة.
- تم سابقًا اكتشاف منظومة ثلاثة كواكب عملاقة حول النجم أبسلون المرأة المسلسلة Upsilon Andromede.
- كذلك رُصد أحد الكواكب المكتشفة "بشكل غير مباشر" بواسطة الشد الناتج عنه على نجمه فى وقت مروره أمام النجم، فى سبتمبر ١٩٩٩، مما يثبت نهائيًا أنها بالفعل كواكب عملاقة تلك التى تم العثور عليها خلال السنوات الأخيرة.

ويكشف لنا مجمل الأرصاد الجديدة بعض تنبؤاتنا بشأن تكوّن المنظومات الكوكبية، ويعلمنا أن التنوع قاعدة. كذلك (الشكل ١، انظر خارج النص) من

الملاحظة المباشرة أن نجمًا من كل نجمين ولد مع قرص كواكب مبكرة حول هذا النجم، وأن هذا القرص بقى بإحكام فى منظومات متعددة وأنه اختفى بعد نحو عشرة ملايين سنة. وفى النهاية فإن ٣ فى المائة من النجوم المرصودة فى الوقت الراهن لها على الأقل كوكب عملاق، كذلك فإن ٠,٠٣ كان لها سابقا قيمة صغرى لمعاملنا f_p الذى لم يعد طفيفًا كما كان يُعتقد من قبل. ويضاف إلى ذلك أن حساسية طرائق الرصد الراهنة، التى تعتبر محدودة بالكواكب الأكثر ضخامة مثل زحل، ومع ملاحظة أن الكواكب الأكثر عددًا التى يتم العثور عليها هى الأكثر خفة، فمن المشوق القول إن "الأراضى" الصغيرة جدًا والتى تعتبر أيضًا صعبة المنال، ربما تكون كثيرة العدد أيضًا. وفى انتظار رصدها فعلاً، لن يقل التقدير المتفائل لكنه الممكن للعامل f_p عن ٠,٥، أى أن نجمًا من كل نجمين من مجرتنا قد تكون له حاشية من الكواكب؛ لذلك فإننا نعرف حاليًا أن هناك بين "خمسة مليارات وعدة عشرات المليارات من المنظومات الكوكبية" فى مجرتنا!

وفى المجالات المرتبطة بالحياة، تم إنجاز خطوات تقدم بالتأكيد أيضًا. وفى الواقع منذ المحاولات الأولى للبحث عن حياة خارج الكرة الأرضية، وُلد علم جديد يتعامل بكامله مع مشكلة ظهور الحياة: هو علم الحياة الفلكى exobiologie. وكشفت الأبحاث فى هذا المجال أن عددًا كبيرًا من الصعاب ربما ظهرت فى طريق الحياة، وفى كل الأحوال.فهى مثل تلك التى ظهرت على الأرض. ولا تُظهر هذه الأعمال فقط أهمية الماء لكن أيضًا ضرورة وجود دورة متعاقبة خارج وداخل هذا الوسط السائل.

كذلك يجب مراجعة n_t وf_v بصورة واضحة. وعلى وجه خاص أنجز ميشيل هارت Michael Hart عمل نموذج كامل لتطور الغلاف الجوى للأرض مع الوضع فى الاعتبار وجود محيطات، ولتغير الدفق الشمسى منذ تكونه، وتغيرات تركيب الغلاف الجوى، وظاهرة الاحتباس الحرارى، والغطاء الغيمى، والجليد... إلخ. كذلك يمكن توضيح سبب أن كوكب الزهرة كان بهذه الدرجة من السخونة رغم أنه قريب نسبيًا من الأرض وسبب أن المريخ، الذى عرف هو نفسه الماء

السائل على سطحه خلال عدة مليارات من السنوات، لم يستطع أن يستعيد غلافه الجوى مرغمًا بهذا الشكل الماء على أن يظل على هيئة جليد. ويبين هذا النموذج بشكل خاص أن ظروفًا مناسبة تمامًا نتجت على الأرض حتى تظل درجة الحرارة عليها ثابتة نسبيًا بينما تزداد قوة إشعاع الشمس. وبشكل خاص كان يجب أن يحتوى الغلاف الجوى البدائى للأرض، المشابه لنظيره على الزهرة والمريخ، على الكثير جدًا من الغاز الفحمى الذى أعاد تسخينه، لإنتاجه ظاهرة الاحتباس الحرارى الشهيرة. لكن مع وجود سائل الماء استطاع الغاز الفحمى أن يذوب وأن يترسب مع الكالسيوم لتكوين صخور جيرية موجودة حاليًا على الأرض. كذلك عندما كانت الشمس تصطلى، كانت ظاهرة الاحتباس الحرارى تتناقص، وفى الوقت الحالى تعتبر درجة الحرارة ثابتة "بشكل لطيف". وعلى كوكب الزهرة كان الجو ساخنًا منذ البداية ولم يستطع الماء الموجود عليه على هيئة بخار أن يذوب الغاز الفحمى فى الغلاف الجوى. واستمرت ظاهرة الاحتباس الحرارى وساعدتها الشمس، ولم يعد سوى أن يزداد الموقف سوءًا مع مرور الزمن.

كذلك استطاع ميشيل هارت أن يبين أن موقع الأرض فى المجموعة الشمسية كان أكثر حرجًا بكثير مما نظن، وبشكل خاص أنه يمكن تقريب مسافتها الراهنة عن الشمس ببضعة أجزاء من المائة، ولو انطلقت ظاهرة الاحتباس الحرارى هذه لما أمكن أبدًا أن يظهر الماء السائل. وبالطريقة نفسها بيّن أنه فى حالة إبعادها بالكاد ١ فى المائة عن الشمس، لكانت المحيطات قد تبدلت إلى جليد ومع ضوء الشمس، الذى ينعكس بشكل أكثر فعالية (حيث إن الجليد أبيض)، لكانت الأرض قد ظلت شديدة البرودة تحت معطف من الجليد الذى لم يكن له أبدًا أن ينصهر.

ونحن نوجد هكذا (ولم يكن ذلك بالصدفة) فى المنطقة الوحيدة الممكنة فى جوار الشمس حيث يمكن للماء أن يظل سائلاً زمنًا طويلاً كافيًا على سطح كوكب ما، منطقة لا تمثل سوى أجزاء من مائة من حجم المجموعة الشمسية. ولحسن الحظ يضاف إلى ذلك أن الأرض لم تكن أكثر صغرًا لأنها كانت، فى حالة عجزها

عن الاحتفاظ بغلافها الجوى، ستشهد مصير المريخ. لذلك يجب إعادة النظـــر فـــى الرقم n_t رقم الكواكب المناسبة لظهور الحياة، فى اتجاه "التخفـيض" ولا يجـب أن يتجاوز أجزاء من مائة، يساوى مثلاً ٠,٠١.

والبارامتر المرتبط بظهور الحياة `fv يجب أيضًا مراجعته. ويبدو بالفعل أن هناك سلسلة من المعوقات يجب اجتيازها.

وتتضمن الخطوة الأولى تكوين جزيئات عضوية انطلاقًا من مـواد أصـلية من الأرض. وفى هذا النطـاق، كانـت تجـارب هارولـد أورى Harold Urey وستانلى ميلر Stanley Miller قد بينت أنه يمكن بشكل تقريبـى، فـى المختبـر، انطلاقًا من خلطات غازية فيما يشبه الأغلفة الجوية البدائية، تكوين كل الأحمـاض الأمينية المعروفة (وهى لبنات الأحياء) بمساعدة إسهام طاقة مثـل الـضوء فـوق البنفسجى أو تفريغ الشحنات الكهربائية. ومثل هذه الجزيئات الناتجة فـى الغـلاف الجوى بمعدل طن كل ثانية، تذوب فى المحيطات حيث يمكنها البقاء فى مأمن من الأشعة فوق البنفسجية (التى بدون ذلك لكانت قد فككتها). ومع بدء دورة "خـارج الماء – داخل الماء"، تتركز تلك الجزيئات شيئًا فشيئًا وينتهى بها الأمـر بتكـوين حساء عضوى تحدث فيه المرحلة التالية.

ولقد تم إنتاج كمية كبيرة من الأحماض الأمينية، فـى الواقـع؛ لأنـه فـى الكائنات الحية الأرضية، لا يلعب دورًا سوى عشرين فقط. وعلى العمليـة التاليـة تخليق سلاسل طويلة من تلك الأحماض (التبلمر polymerisation) ولكن ابتـداء من البعض من بينها فقط. والصعوبة هنا أن التبلمر يحدث بشكل جيـد جـدًا فـى الماء، ولكن حيث إن الماء يفكك أيضًا بشكل جيد تمامًا سلاسل الجزيئات المتبلمرة، نكون فى موقف بينولوبى[١٢] أن تقوم بعملها أو لا تقوم به بلا توقف. وفـى هـذه الحالة يجب العثور على طريقة لحماية البوليمرات من الماء وتصبح دورة "خـارج الماء – داخل الماء" من جديد ضرورية. وهنا يـصبح مـن الـضرورى وجـود

---

(١٢)بينولوبى Penelope: فى الأساطير هى زوجة أوديسيوس ووالدة تليماخوس. (المترجم)

بحيرات تتبخر، وأماكن ملائمة لتأثيرات المد والجزر. ولا شك أن وجود تابع ضخم مثل القمر يعتبر شرطًا ضروريًا آخر لظهور الحياة.

بعد ذلك يجب على هذه الجزيئات المعقدة أن تنعزل عن البيئة الخارجية (ظهور الغشاء) وأن تجد طريقة للتكاثر. هذا هو مسلك الخامد إلى الحى، وهو مسلك معرفتنا به سيئة ولم يتم البت فيه بعد. إلا أننا قد عرفنا سابقًا كيف نحصل على الأغشية (متعقدات coacervats أوبارين[١٣] الشهيرة) وننسخ بضعة بوليمرات. ولحدث هذه المرحلة يعتبر الرجوع الجزئى فى وسط سائل أمر ضرورى. مرة أخرى دورة "خارج الماء - داخل الماء".

بعد ذلك يجب تكوين المنظومات الحية الأولية وحيدة الخلية، الخلايا التى وجدت على الأرض منذ أكثر من ٣,٨ مليار سنة حيث تم العثور على آثارها الأحفورية.

ثم قامت آلية الانتخاب الطبيعى بتطوير تلك المنظومات الحية فى اتجاه كائنات أكثر فأكثر تعقيدًا.

وخلال تعاقب المرا[illegible] كانت الأشياء تتم فى أول الأمر ببطء شديد حيث يحتاج الأمر إلى ٢٠٠ مليون سنة على الأقل لإنتاج حساء عضوى ذا تركيز كاف فى المحيطات. وبعد ذلك بسرعة أعلى فأعلى يجب أن تتسلسل الآليات لتؤدى إلى ظهور كائنات حية بدائية. ويبدو أن هذا التعاقب للأحداث لا مفر منه، لكنه يبدو مع ذلك متوقفًا على دورة "خارج الماء - فى الماء" التى قد لا تحدث بشكل دائم. وكما أنه مازال من الصعب تقدير كل عامل، يبدو من المناسب تمامًا القول فى وقت الحالى إنه بشكل عام f_v له القيمة ٠,١ مع وضع هذه الصعوبة فى الاعتبار.

---

(١٣) أوبارين (إلكسندر إيفانوفتش) Oparine (Aleksandr Ivanovitch): عالم كيمياء وبيولوجيا سوفييتى (١٨٩٤ - ١٩٨٠). وهو صاحب نظرية حول أصل الحياة انطلاقًا من مركبات كيميائية فى الغلاف الجوى البدائى للأرض(١٩٢٤). (المترجم)

ثم تأتى التقديرات غير المؤكدة أكثر فأكثر والتى لم تحصل، في الواقع، سوى على قليل من التقدم خلال السنوات الأخيرة. إلا أنه يمكن القول إنه لظهور الذكاء، يمكن أيضًا تحديد العديد من المراحل التحتية sous - etapes مثل:

- تطور غلاف جوى من الأكسجين ناتج عن الكائنات الحية، رغم أنه يمثل أكبر كارثة بيئية عبر كل العصور، ومسؤول بالتالى عن اختفاء أنواع رئيسية على الأرض، فقد أتاح هذا التغير تطور خلايا متشكلة النواة eucaryotes، قادرة على استخدام الطاقة المنطلقة من التفاعلات الكيميائية التى أحدثها الأكسجين. واستطاعت تلك الآليات الجديدة، في وقت متأخر تمامًا، أن تقوم بتشغيل منظومة مثل المخ، المستهلك الأكبر للطاقة.
- يبدو أن مسار الوسط المائى فى الأرض الصلبة ضرورى أيضًا، ويعتبر شكلاً جديدًا من دورة "خارج الماء - داخل الماء"، وأصبح ممكنًا بتكوين غلاف الأوزون، الذى تكون هو نفسه انطلاقًا من غلاف جوى من الأكسجين، ويحمى هذا الغلاف الكائنات الحية من الأشعة فوق البنفسجية للشمس، تلك الكائنات التى كانت محرومة من الحماية المائية، ويبدو أن هذا المسار على الأرض الصلبة ضرورى لتطوير مخ؛ إذ إنه حتى الحوتيات ذات القدرات المخية الواضحة هى نتيجة تطور الكائنات التى شهدت فترات إقامة مؤكدة خارج المحيطات لتعود إليها فيما بعد.
- ويبدو أيضًا أن التنظيم الحرارى مرحلة ضرورية، فالواضح أن المخ يعمل بشكل أفضل فى بيئة منضبطة.
- ظهور اليدان والعينان قد يكون أيضًا لا مفر منه فى التطور السليم للمخ، والاستخدام الجيد لهاتين الحاستين يفرض رياضة خلاقة جدًا.
- ولا شك أن استخدام الأدوات يلعب دورًا مشابهًا.
- تطوير بنية اجتماعية وضعت أيضًا قيودًا جديدة على عمل المخ.

ويظل تطور العامل f_i شديد الغموض لكنه قد يكون قريبًا من الواحد، إذا أخذنا فى الاعتبار آليات فعالة جدًا للانتخاب الطبيعى.

وفى موضوع الاتصال، تم القليل من خطوات التقدم مع هذه الدرجة من تعقد المشكلة. ومع ذلك ما يمكن إضافته أنه يجب ليس فقط أن نأخذ فى الاعتبار قدرة f_c على الاتصال ولكن أيضًا رغبة f_d فى الاتصال، وهو بارامتر جديد أكثر غموض أيضًا. وفى الواقع ليس من السهل معرفة ما إذا كانت حضارة ما لديها الرغبة أم لا فى الاتصال. ومع ذلك، حيث إن الجميع لا يمكنهم أن يتخذوا الموقف نفسه، من أجل ستر جهلنا فإنه من "المعقول" أن نقول إن f_c له قيمة الوحدة عندما يكون f_d له قيمة ٠,٥.

وهذه التقديرات شديدة الصعوبة حتى أنه ربما لم يبق لنا سوى أن نمزح من موضوع الاتصال بتخيل حوار بين دلفينين، إذ يقول أحدهما للآخر: "حقًا يقوم البشر بتبادل إشارات وتصدر عنهم أصوات، لكن ليس هناك برهان قاطع على أنهم يتصلون فعلاً فيما بينهم".

والبارامتر الأخير T يعين الزمن التى سوف تتصل خلاله حضارة ما، من الواضح أنه أيضًا أكثر غموضًا، لكن هنا أيضًا يمكننا أن نوضح أنه من الصعب تخيل أن هناك حضارة تحاول الاتصال بلا نتيجة خلال أكثر من مليون سنة، ويجب فى الواقع أن يصيبنا الملل تماماً!

وهكذا فإن تقديراتنا الجديدة تعطينا مع التقديرات المتشائمة N بالمقدار ٠,٠١ حضارة فى مجرتنا فى طريقها للاتصال، بينما مع تلك المتفائلة تكون N على الأحرى بقيمة ١٠٠ حضارة. وتظل هذه الأرقام غير مؤكدة بدرجة كبيرة، وقد يكون من المحتمل تمامًا فى نهاية الأمر أننا وحدنا.

المراجع:

- Cocconi (G.) et Morrison (P.), « Searching for Interstellar Communications », *Nature, 184*, 1959.
- Hart (M.-H.), « The Evolution of the Atmosphere of the Earth », *Icarus, 33*, 23, 1978.
- Hart (M.-H.), « An explanation for the Absence of Extraterrestrials on Earth », *Q.J.R. Astron. Soc., 16*, 128, 1975.
- Mayor (M.) et Queloz (D.), « A Jupiter-mass Companion to a Solar-type Star », *Nature, 378*, 355, 1995.
- Rood (R.) et Trefil (J.), *L'Univers : Sommes-nous Seuls ?*, éd. P. Belfond, 1985.
- Sagan (C.), *The Dragons of Eden*, Random House Inc, 1977.
- Sagan (C.) et Schklovsky (I.-S.), *Intelligent Life in the Universe*, Holden Day, San Francisco, 1968.
- Vidal-Madjar (A.), *Il pleut des planètes*, Hachette Littératures, Paris, 1999.
- Prantzos (N.), *Voyages dans le futur*, Seuil, Paris, 1998.
- Heidman (J.), Vidal-Madjar (A.), Prantzos (N.) et Reeves (H.), *Sommes-nous seuls dans l'Univers ?*, Fayard, Paris, 2000.

تطور المجرات والكوازارات[١٤]

بقلم: فرانسواز كومبيه

Frnçoise COMBES

ترجمة: عزت عامر

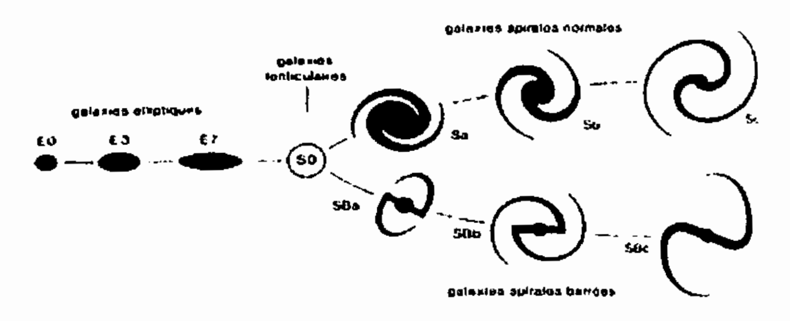
الأنواع المختلفة من المجرات

تُرصد المجرات على أشكال متعددة وعلى عدة أنواع مختلفة. والتصنيف الرئيسى يميز بين المجرات ذات الأقراص المسطحة، والمجرات اللولبية، والمجرات الإهليلجية، التى تتألف بشكل أساسى من شبه كرة من النجوم القديمة. ويضع تسلسل هابل (الشكل ١) الأنواع التشكلية morphologiques المختلفة تبعًا لتركز كتلها المركزية. ويكون فى المجرات اللولبية أيضًا شبه كرة مركزة من النجوم القديمة بالإضافة إلى قرصها، وتزداد تدريجيًا أهمية هذه "البصلة" المركزية عبر التسلسل (من اليمين إلى اليسار). ويتركز غاز ما بين النجوم فى القرص، مع النجوم الشابة جديدة التشكل انطلاقًا من الغاز، وهذا هو سبب أن فئة كتلة الغاز تتغير أيضًا عبر التسلسل، وينقص هذه المرة من اليمين إلى اليسار. وتزداد الكتلة الكلية للمجرة من اليمين إلى اليسار. ويضاف إلى ذلك أن هيئة اللولب تتطور أيضًا عبر التسلسل: يزداد لف الأذرع كلما تحركنا إلى اليسار.

وتعتمد فئة الأنواع التشكلية المختلفة إلى درجة كبيرة على البيئة. ففى تكوينات الركام الكثيفة للمجرات، تسود الأشكال الإهليلجية. وفى الأماكن الأكثر انعزالاً، تكون الأشكال اللولبية هى السائدة (وتمثل ثلثى المجرات). ويؤدى التفاعل بين المجرات إلى تسارع نسبة التطور، أى تكوّن النجوم انطلاقًا من الغاز، مما يركز ويزيد كتلة المجرة.

---

(١٤)نص المحاضرة رقم ١٩٥ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٣ يوليو ٢٠٠٠.



الشكل (١)

تسلسل هابل للمجرات. على اليسار المجرات الإهليلجية، التى تظهر لنا على هيئة أشكال إهليلجية كما تبدو فى السماء، والتى هى فى الحقيقة أشباه كرات، مسطحة أو ممتدة إلى حد ما. وعلى اليمين مجرات لولبية بأقراص، غير أنها تحتوى على شبه كرة فى مركزها، أو "بصلة". وتكبر نسبة البصلة فى القرص من اليمين إلى اليسار. وهناك فرعان من المجرات اللولبية: الملتوية وغير الملتوية. وتشتمل الأولى فى الواقع على ثلاثة أرباع المجرات اللولبية.

المجرات فى تطور دائم

تتعرض المجرات إلى قوى متعارضة: الجاذبية من ناحية، وهى المحرك الرئيسى لتجميع الكتلة، وفى تعارض مع هذا الجذب هناك الدوران فى أصل قوى الطرد المركزى، وحركات الاضطراب غير المنظم. وفى هذه الحالة فإن كل مجرة تميل إلى تركيز كتلتها للإقلال من طاقتها.

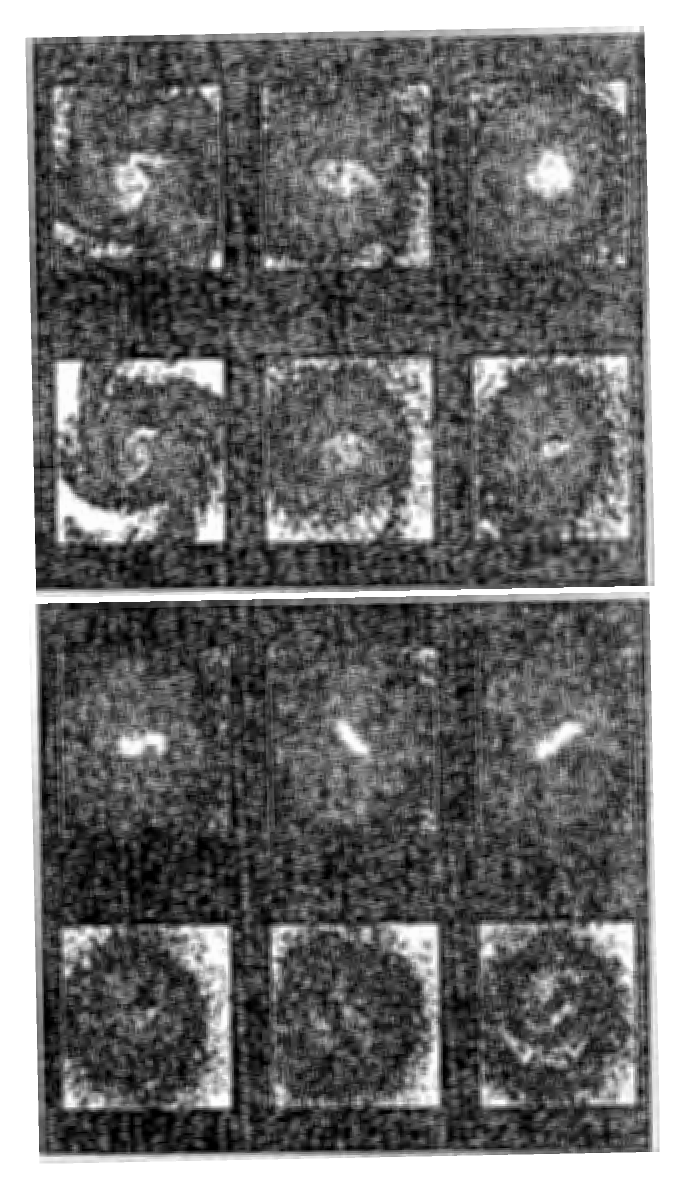
ولتحقيق هذا الغرض من الضرورى أن يكون لدى المجرة غاز للإقلال من حركة الاضطراب، وتدخل السحب الغازية فى تصادم وتبدد الطاقة بالإشعاع.

ولا تعود النجوم، نفسها، إلى التصادم أبدًا (فهى متماسكة جدًا بالنسبة لمسافاتها النسبية)، ولا تتشتت أبدًا الطاقة الحركية المتعلقة بحركاتها النسبية؛ لذلك

فإن المجرات الإهليلجية، بدون غاز، تصل إلى توازن نسبى، بفضل الاضطراب غير المنظم للنجوم، ولا تتطور بعد ذلك. وإذا كانت مسطحة، فإن ذلك ليس بسبب الدوران، لكنه يعود إلى أن الاضطراب غير المنتظم أكثر ضخامة فى اتجاه المحور الكبير لشبه المجسم الناقص.

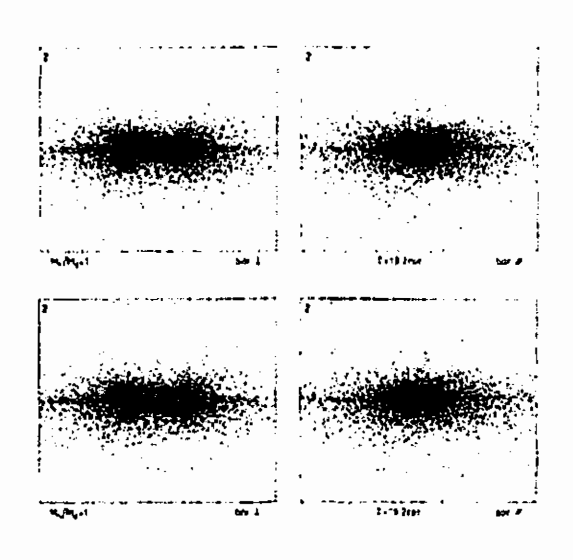
والمجرات ذات القرص، نفسها، لديها غاز ويمكنها أن تشتت الطاقة الحركية. ويضاف إلى ذلك أن تكوين اللوالب فعال جدًا فى إخراج الدوران. وليست اللوالب أذرع مادة، مثل سحابة اللبن فى القهوة بعد تقليبها، لكنها موجات. والموجات هى الوحيدة التى يمكنها أن تبقى رغم الدوران التفاضلى. ولأن المجرات لا تدور مثل أى جسم صلب (مثل قرص أسطوانة طويلة الأمد)، لكن المركز يدور بسرعة أكبر من الحافة. وتستغرق المادة فى المركز ملايين السنوات لإكمال دورة. وفى تلك الأحوال يلف الذراع المادى بسرعة كبيرة، عدة مئات من الدورات منذ بداية الكون، وقد يزول اللولب كله. ولا توجد مشكلة اللف هذه لو أن اللوالب كانت موجات. وتدور الموجات حول مركز مثلها مثل الأجسام الصلبة، أكثر بطئًا بكثير من النجوم. وتدخل النجوم فى الموجة اللولبية، وعند خروجها من جديد، بعد بضعة ملايين من السنوات. ويمكن أن تستمر الموجات كذلك زمنًا أطول، لكنها أيضًا ليست أبدية. وتتبادل الطاقة مع المادة وتظهر وتختفى على مقاييس زمنية تصل إلى ١٠٠ مليون سنة. وإذا كان هناك غاز، يمكنها أن تتجدد بلا توقف، ولو كانت هذه الموجات تلف فى اتجاه "الخلفية"[١٥] بالنسبة لدوران المجرة، فإنها تتيح إخراج الدوران نحو الخارج، وتكون المجرة أكثر تركيزًا بعد مرور الموجات. واللوالب المرصودة فى المجرات تلف، فى الواقع، بشكل دائم فى اتجاه "الخلفية".

(١٥) الخلفية أو المُنجرّ فى الخلف trainant: وهى كلمة مأخوذة من الكلمة الإنجليزية trailing.



الشكل (٢)

المراحل المختلفة لتكوين حاجز تكسر موجات، فى محاكاة رقمية. فى الأعلى النجوم وفى الأسفل الغاز. يتكون لولب أولاً، يقوم بتفريغ جزءاً كبيراً من العزم الزاوى، ويتيح للحاجز أن يتضخم. تتكون حلقة فى الغاز، بدلاً من الرنين مع الحاجز.



الشكل (٣)

مسقط للحاجز عند نهاية المحاكاة، معروضًا على هيئة شريحة،
عندما يكون الحاجز عموديًا (إلى اليسار) وموازيًا (إلى اليمين) لخط الرؤية.
والنجوم مرفوعة عموديًا على المستوى بواسطة أنواع الرنين، وتشكل بنية حبة فستق.
(تبعًا ل كوبيه وساندير Combes et Sanders, A&A 96, 164, 1981)

من جهة أخرى فإن الموجات تساعد على تكوين النجوم انطلاقًا مـــن الغـــاز. وتزداد الكثافة في الموجات ويكون الغاز مضغوطًا وينطلق عدم التوازن الجـــاذبي: تتكون نجوم جديدة في الذراع اللولبي. وباختصار، يسارع تكوّن الأذرع اللولبية فـــي تطور المجرات: يتيح للكتلة أن تتركز مع تفريغ الدوران، وللنجوم أن تتكون انطلاقًا من الغاز، وكذلك فإن الموجات الأكثر فعالية من الموجات اللولبية هـــي الموجـــات المتكسرة onde barrees، يمكن النظر إلى الموجات اللولبية على أنها موجات متتالية على وتر، بينما المتكسرة تكون موجات مستقرة. ويدوم تأثيرها بـــالأحرى. ويـــسبق تكوّن حواجز تكسر الموجات تكوّن اللولب، كما هو مشار إليه في الشكل ٢.

وثلاثة أرباع المجرات اللولبية موجات متكسرة، تبعًا لنتـائج جديـدة فـى الضوء القريب للأشعة تحت الحمراء، الذى يُظهر الامتصاص بالغبار. وحـواجز التكسر تعتبر عاملاً قويًا فى التطور، وتحول الكتلة نحو المركـز، مثـل اللوالـب السابق ذكرها. وينتظم تأثيرها ذاتيًا، حيث هناك الكثير من الكتلـة فـى المركـز، ويضعف الحاجز وحتى قد يختفى. ويحدث ذلك خلال عدة مراحل.

وبفضل أنواع الرنين بين الحاجز ومادة القرص، يتم دفع النجوم إلى أعلـى، عموديًا على القرص. وتتكون فى هذه الحالة بصلة على هيئة علبة أو حبة فـستق (الشكل ٣). وفى هذه الحالة يشارك تركيز الكتلة المركزية فى تكوين البصلة.

ويتكدس الغاز نفسه فى المركز، فى مناطق رنين، تقوم بتكوين حلقات، وقد تنتج شعلات من تكوّن النجوم، حيث إن كثافة الغاز المتكدس تكون كافيـة لـذلك. ويمكن لجزء من الغاز أيضًا أن يغذى ثقبًا أسودَ ضخمًا سبق تكونه فـى المرحلـة السابقة. ويساعد على هذه الظاهرة تخليق حاجز ثانى، داخل الحاجز الأول، يـدور أيضًا بسرعة أكبر. ويمكن أن تتداخل الحواجز / اللوالب أحدهما فى الآخـر مثـل العرائس الروسية (الشكل ٤ خارج النص). وتتناوب فى العمل لكى تقوم بتركيـز الكتلة فى المركز.

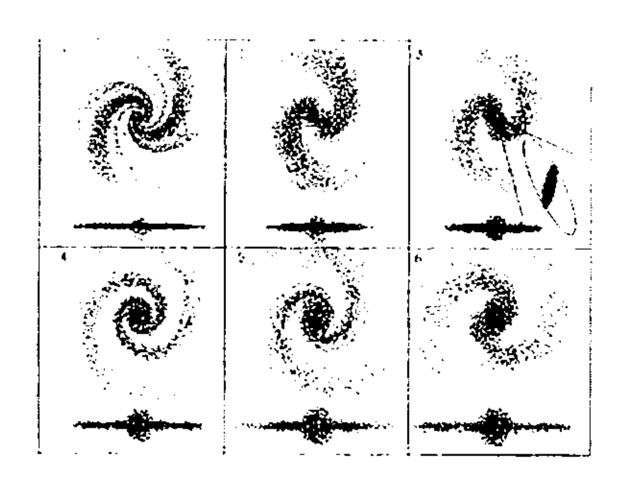
وعندما يصبح تركيز الكتلة فى اتجاه المركز بالغ القوة، يـضعف الحـاجز ويختفى. والغاز الذى سقط فى المجرة فى الأجزاء الخارجية يقوم عندئـذ بتغذيـة القرص، ولا يعود من جديد بعد ذلك إلى المركز. ويعود التوازن قرص / بـصلة إلى ما كان عليه لصالح القرص، وقد تعود من جديد حالة عدم استقرار أخرى على هيئة حاجز / لولب، ثم يبدأ كل شىء من جديد. وقد تقع عـدة أحـداث عرضـية حواجز / لوالب فى المجرة خلال حياتها.

من أين تأتى تلك المادة الجديدة التى تغذى القرص من جديد؟ تعتبر المجـرة منظومة مفتوحة، تكون دائمًا فى طريقها إلى الحصول على كتلة. ويأتى الغاز من الأجزاء الخارجية ويسقط نحو المركز. وهناك الكثير من الغاز حـول المجـرات،

يُرصد بالفلك الراديوى بفضل خط الهيدوجين الذرى HI على طـول موجـة ٢١ سنتيمتر. ويمتد الغاز المرئى فى HI حتى الشعاع الذى يساوى ٤ مـرات شـعاع القرص المرئى بالبصريات (الشكل ٥ خارج النص).

تطور على طول تتالى هابل

من كل الظواهر التى تم وصفها سابقًا، يمكن استنتاج تطور مجـرات فـى تتالى هابل. تدخل المجرات فى التتالى من اليمين، على هيئة منظومات غنية جـدًا بالغاز، سيان كانت غير منتظمة أو لوالب ذات تطور ضئيل جـدًا. وتكـون هـذه الأقراص غير مستقرة بدرجة كبيرة وتشكل لوالب وحواجز بسرعة كبيرة. وتركز تلك الحوجز الكتلة في اتجاه المركز لتشكل بصلة صغيرة (الـشكل ٦). ويـضعف الحاجز ويصبح أكثر تناظرًا حول المحور، ويحصل على غاز من القرص ويعيـد تكوين حاجز، حتى أنه قد يكون متراكب مرتين. وتصبح البصلة أضخم فأضـخم، فترتفع المجرة ثانية إلى تتابع هابل. والأقراص المرصودة فى الوقت الراهن تعتبر شابة نسبيًا، وليست هى الأقراص القديمة. ويتسارع هذا التطـور أيـضًا بحـدوث تفاعلات المجرات.



الشكل (٦)

رسم تخطيطى لتطور مجرات على طول تتالى هابل. تكون المجرة ذات القرص قليلة الضخامة، وبدون بصلة، غير مستقرة على هيئــة لولــب / حاجز، ويحشد ذلك الكتلة فى اتجاه المركز (انظر تطــور البـصلة فــى العرض الجانبى). وعندما يكون هناك الكثير من الكتلــة فــى المركــز، يختفى الحاجز، والغاز الآتى من الخارج يثرى القرص. وبعد ذلـك قــد يتكون حاجز آخر، عندما تصبح نسبة قرص / بصلة فى مستوى مناسب. قد يحل حاجز ثانٍ (قارن المرحلة ٣) محل الحاجز الأول فــى تركيــز المادة فى اتجاه المركز.

تفاعل واندماج المجرات

لم تتضح طبيعة التفاعل بين المجرات سوى فى السبعينيات، بفضل المحاكاة بواسطة الكمبيوتر. وهو تفاعل مد وجزر جاذبيين. ويتيح المد والجــزر تــشكلات مختلفة جذا عن ظواهر المد والجزر فــى المجموعــة الشمــسية؛ لأن المجــرات منظومات ضعيفة الارتباط إلى حد ما، قابلة لتغير الشكل بدرجــة كبيــرة. ولقــد نجحت بشكل ملحوظ عمليات المحاكاة الأولى البسيطة، على ٣ أجسام، فى إظهــار آلية تكوين اللوالب بذراعين.

ويعتبر تفاعل المد والجزر ثنائى التناظر، مثل ظواهر المد والجزر الأرضية الناجمة عن الشمس والقمر (تحدث ظاهرتا مد وجزر كل ٢٤ ساعة). ويكون الاضطرابان عند انطلاقهما مشدودين على هيئة خيوط رفيعة وجسور بين المجرات، ويلتفان بفضل الدوران التفاضلى للمجرة، التى تدور بسرعة فى المركز أكبر منها فى الأطراف.

وغاز الهيدروجين الذرى قابل لتغيّر الشكل إلى حد بعيد؛ لأنه أقل ارتباطًا بالجاذبية بالمجرة، وأيضًا متكون من عمليات تشكل أكثر إثارة (الشكل ٥، انظر خارج النص).

وعندما يكون التصادم فى اكتمال أوجه فإنه يكوّن موجات على هيئة حلقة تنتشر من المركز إلى الطرف، مثل الموجات التى تحدث على سطح الماء عند رمى حجر. وعند مرور الموجة تنطلق شعلة تكوين نجوم، مما يجعل الحلقة متوهجة بشكل خاص (الشكل ٧، انظر خارج النص). وفى الاتجاه العمودى على المستوى، تكون المجرة أيضًا متغيرة الشكل تمامًا. وبعد الهيجان، يتشوه المستوى ويلتوى على هيئة المعجنات المتموجة، ويهتز خلال مدة طويلة. ويتم رصد كل مستويات المجرات وهى تتشوه، حتى مع غياب اضطراب خارجى واضح. وهذه الظاهرة مثيرة؛ لأنها تتيح لنا أن نحصل على معلومات عن الجهد الجاذبى فى الأبعاد الثلاثة، وخاصة الذى يكون على هيئة هالات ومادة سوداء، تلك المادة التى لا تشع، بل التى نظن أنها تسود مادة المجرات، بسبب تحركات المادة.

وعند حدوث التفاعلات بين المجرات تتبادل المجرات المادة، ومن السهل معرفة ذلك؛ حيث إنها ليس لها اتجاه الدوران نفسه. وكذلك تم رصد العديد من المنظومات بتيارين فى حالة دوران معاكس، فبعض النجوم تدور فى اتجاه وبعضها فى الاتجاه الآخر. وأحيانًا لا يدور الغاز فى اتجاه النجوم نفسها. وتسبب تلك المنظومات حالات خاصة تتسم بعدم الاستقرار فى ذراع لولبى. ولا يكون تجمّع المادة أحيانًا فى المستوى نفسه، ويدور جزء من المادة فى المستوى العمودى على المستوى الرئيسى (حالة الحلقات القطبية). والتفاعل بين مجرتنا الخاصة،

درب اللبّانة، وسحب ماجلان، أدت إلى تكوّن تيار "ماجلانى"، وهو حلقة قطبية من الغاز، تدور فوق رؤوسنا، على مستوى متعامد مع مستوى درب اللبّانة.

وحول مجرة إهليلجية، تهتز نجوم مجرة مصاحبة، ما إن تُدمر تلك المجرة بقوى المد والجزر، تبعًا لطاقتها في جهد المجرة الرئيسية، وتبعًا لرقصتها المرسومة في قباب النجوم سريعة الزوال، وهذه الظاهرة مرصودة بالفعل في نصف المجرات الإهليلجية (الشكل ٨، انظر خارج النص).

والتصادم بين المجرات يعتبر غير مرن إلى درجة كبيرة. ويحتاج الأمر إلى الكثير من الطاقة لتغيير شكل المجرات. وهذه الطاقة مأخوذة من جهد الطاقة المدارية، وفي هذه الحالة من الحركة النسبية للمجرات بالنسبة للمجرات الأخرى. وهذا يكبح المجرات، التى تقترب من بعضها البعض في حركتها اللولبية. وبعد دورة أو دورتين، تتحد المجرات، تنهار كل منهما على الأخرى. ويتم امتصاص العزم الزاوى والدوران بالمادة السوداء المحيطة. ويذهب الغاز HI بشكل أساسى في ذيول المد والجزر. والغاز الأكثر كثافة، الجزيئى، يتراكم في المركز. ويطلق هذا التراكم أسهمًا نارية، لهب تكوّن النجوم. وبعض المجرات يكوّن نجومًا بمقدار ١٠٠٠ في العام، بينما النسبة العادية تكون غالبًا بمقدار نجم في السنة. وبهذا الإيقاع، تستنفد النجوم غازها بسرعة، وتلك النجوم لا تدوم أكثر من فترة زمنية قصيرة، ويُطلق عليها انتفاضة تكوين النجوم، أو انفجار النجم starburst.

تكوّن الثقوب السوداء الضخمة

الثقب الأسود، حسب التعريف، هو جرم متماسك بما فيه الكفاية لأن يوجد حوله أفق تكون سرعة الإفلات ابتداء من عنده أعلى من سرعة الضوء. وبقول آخر، حتى الضوء لا يمكنه الخروج، إذا غامر من مسافة مركز أقل من الأفق. وفي نهاية تطور نجم ضخم من الممكن أن ينفجر سوبرنوفا ويترك بقية متماسكة. هذا هو الثقب الأسود، إذا كانت كتلته أكبر من ٣ كتل شمسية، ولكن لا يجب أن تتجاوز كتلته ١٠ كتل شمسية، كمقدار للضخامة.

ومع ذلك يوجد فى مركز المجرات ثقوب سوداء أكثر ضخامة، لها كتلة من ١٠٠ مليون إلى بضعة مليارات كتلة شمسية. ويسبب وجودها ظواهر منيرة جـدًا، عندما تسقط المادة فى الثقب الأسود، قبل أن تصل إلى الأفق، وهذا ما يُطلق عليـه النوى النشطة للمجرات NAG والكوازارات.

الكوازارات

يعود أصل كلمة كوازار quasar إلى اندماج أشباه النجـوم quasi - stars. وهى أجرام منتظمة، مثل النجوم، بطيف غير عادى. وخطوط الانبعاث المرصودة لا تناظر أى من الخطوط المرصودة فى النجوم. وفى ١٩٦٤ كان مارتين شميدت Marteen Schmidt هو أول من فسر هذا اللغز المحير. ويمكن فهم الطيف بشكل جيد جدًا بالخطوط المعروفة، إذا سلمنا بأنه قد انزاح تجاه الأحمر بكميـة كبيـرة. وهذه الإزاحة نحو الأحمر تعود إلى ظاهرة دوبلر الناتجة عن تمدد الكون. وتتباعد كل المجرات عنا بسرعة تتناسب مع مسافاتها. وحيث إن الكوازارات تتباعد عنـا بسرعات كبيرة فإنها تعتبر أجرام بعيدة جدًا. وظلت طوال زمن كبير الأكثر بعـدًا فى الأجرام المعروفة، وهذا هو السبب فى أنه قد تم فى وقت حديث تمامًا، بفـضل التلسكوب الفضائى هابل، رصـد المجـرات الأكثـر بعـدًا أيـضًا، وبـسبب أن الكوازارات تشع كثيرًا (ألف مرة مثل درب اللبانة) يمكن رؤيتهـا بعيـدة أيـضًا. ويضاف إلى ذلك أنها أكثر ندرة بكثير من المجرات، حتى تلك الأكثر قربًا أيضًا.

وتوجد نوى نشيطة للمجرات ذات أهمية أقل: مجرات زايفرت،[١٦] لينـرز Seyfert, Liners مثلاً، تلك التى يمكن أن توجد أكثـر قربـا منـا. وفـى هـذه المنظومات النشيطة يمكن أن نرى بوضوح المجرة المضيفة، والخفية، والأجـرام

---

(١٦)مجرات زايفرت galaxies de Seyfert: هى مجموعات نجمية غير مجرية (خارجية) لها نواة صغيرة ولامعة تمتد إلى ١٠٠ بارسك ويوجد فى طيفها خطوط انبعاث عريضة، ومن عرض خطوط الانبعاث والإزاحة الدوبلرية لها (ظاهرة دوبلر) يمكن استنتاج درجات حرارة عالية وسرعات تمدد كبيرة لغاز النواة. (المترجم)

التى لا تبدو منتظمة بما يكفى. وطبيعة النشاط واحدة: الإنتاج فعال إلى درجة كبيرة، مما يجعل منطقة صغيرة، النواة، قادرة على الإشعاع أكثر بكثير من مجرة برمتها. ولا يمكن أن يأتى هذا الإنتاج الاستثنائى فقط من التفاعلات النووية التى تجعل النجوم مشعة. ويتعلق الأمر بتحول طاقة جاذبية مباشرة إلى طاقة إشعاع حول ثقب أسود، في قرص تجمّع. وقد يصل الإنتاج إلى ١٠ - ٢٠ فى المائة من طاقة الكتلة mc^2 (بينما يكون إنتاج الطاقة النووية أقل قليلاً من ١ فى المائة).

وعندما يأخذ الغاز شكل اللولب فى اتجاه الثقب الأسود، قبل أن يصل إلى الأفق، حيث إبتداء منه حتى الضوء الذى يبثه يكون مصيره أن يبتلعه الثقب الأسود، ينبعث منه إشعاع قوى الطاقة، على هيئة أشعة سينية وأشعة فوق بنفسجية وإشعاع مرئى..إلخ، وتكون درجة الحرارة شديدة الارتفاع، مليارات الملايين من الدرجات. وقد تُدمَر النجوم نفسها بتأثير المد والجزر عندما تمر بالقرب من ثقب أسود، ويذهب الغاز الذى ينبعث منها إلى تغذية الثقب الأسود.

كيف ينمو الثقب الأسود الضخم؟

كل المادة (غاز أو نجم) التى تسقط فى الثقب الأسود تذهب إلى تغذيته، لكن الثقب الأسود لا يمكنه أن يصاب بالسعار. وعندما يسقط الغاز فإنه يشع كثيرًا، وقد يُطرد الغاز بالقرب من الإشعاع بواسطة ضغط الإشعاع. وإذا ابتلع الثقب الأسود الكثير من المادة، فإنها تشع إلى الدرجة التى تجعل ضغط الإشعاع شديد القوة، ويطرد المادة التى تسقط في الثقب الأسود؛ لذلك هناك قوة إشعاع قصوى يمكن للثقب الأسود الحصول عليها تبعًا لكتلته: وهو حد إدنجتون limite d`Eddington، المتناسب مع كتلته.

وفى أفضل الأحوال إذا ابتلع ثقب أسود مادة عند حد إدنجتون باستمرار، سوف يقضى مليار سنة ليصل إلى كتلة ٣٠٠ مليون كتلة شمسية. لكن فى الواقع هذا حد مثالى، فالمادة حول الثقب الأسود ليست دائمًا متاحة عند حد إدنجتون.

ولابد أن يصوم الثقب الأسود مرغمًا، حتى لو كان فى مركز ركام نجوم. وقد تُدمر النجوم التى تمر بالقرب من ثقب أسود بقوى المد والجزر هذه، حيث تتقلص إلى الحالة الغازية، ثم يلتهمها الوحش. لكن النجوم ذات المسار المطلوب، التى تمر قريبًا جدًا من ثقب أسود، سوف تختفى بسرعة كبيرة، ويجب انتظار أن تنحرف نجوم أخرى بطريقة جاذبية لكى تحتل من جديد هذه المسارات، ويستغرق ذلك زمنًا يصل إلى زمن انتشار النجوم: بضع مئات من ملايين السنين؛ لذلك فإن نسبة نشوء ثقب أسود تكون محدودة بالانتشار، بضعة مليارات السنوات، ما يقرب من زمن هابل، للحصول على كتلة تُرصد حاليًا فى الكوازارات.

إحصاء الكوازارات

نعرف فى الوقت الراهن عشرات الآلاف من الكوازارات، ولتفسير عددها هناك سيناريوهان محتملان:

- إما أن مجرات نادرة فى مركزها ثقب أسود بالغ الضخامة، وتشع باستمرار على هيئة كوازارات.
- إما أن الظاهرة شائعة جدًا؛ حيث تكون الثقوب السوداء أقل ضخامة لكنها لا تشع إلا خلال فترة زمنية محدودة تمامًا.

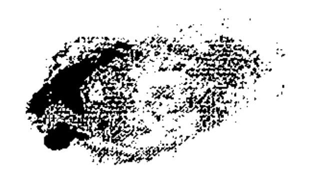
وتتيح الأرصاد التخلى عن السيناريو الأول، حيث إنه لو كانت هذه هى الأجرام نفسها دائمًا، التى تشع ومن ثم تزداد فى كتلتها، كان يجب أن نلاحظ ثقوبًا سوداء أكثر ضخامة أيضًا من تلك التى نراها اليوم. ومن ناحية أخرى فإن الثقوب السوداء تنقصها التغذية إجباريًا، عندما تكون قد التهمت كل ما يجاورها. وفى الأغلب يكون السيناريو الثانى هو المفضل: هناك فى الوقت الراهن ثقب أسود ضخم بالفعل فى كل المجرات، لكن دوام النشاط يكون بضع عشرات من ملايين السنين.

ولقد تبين وجود ثقب أسود فى مجرتنا ذى كتلة ٢ مليون كتلة شمسية، بناء على الحركة الخاصة بالنجوم بالقرب من نواة. وأتاحت دراسة عدة مجرات قريبة، بوضوح فضائى كبير، اكتشاف علاقة تناسبية بين كتلة ثقب أسود وكتلة بصلة المجرات (أو شبه الكرة، إذا كان الأمر يتعلق بشكل إهليلجية). وتساوى كتلة الثقب الأسود ٠,٢ فى المائة من كتلة البصلة.

مظاهر النشاط

كيف يظهر نشاط النوى؟ لا تشبه خطوط الانبعاث تلك الصادرة عن مجرة عادية: أطوال الخطوط، المعبر عنها بسرعات، تكون هائلة، عدة آلاف من الكيلومترات فى الثانية. وكلما اقتربنا أكثر من ثقب أسود كلما أصبحت السرعات نسبوية. ومن ناحية أخرى فإن الطاقة المنبعثة من الفوتونات تكون ضخمة جدا، مثال لذلك تكون الأشعة السينية شديدة، أكثر شدة بكثير مما يمكن أن تصنعه النجوم، نجوم السوبرنوفا، وموجات الصدمة المصاحبة لها. ويضاف إلى ذلك أن بعض النوى ينبعث منها دفقات من الغاز المتأين بسرعات شبه نسبوية. وهذه الدفقات مرئية تماما بالأشعة الراديوية المتصلة، وهى معروفة جدًا، حتى مسافات ٣٠٠٠٠٠ سنة ضوئية؛ أى ١٠ أنصاف أقطار مجرية (الشكل ٩). وتعتبر التقلبية القصيرة جدًا فى الانبعاثات، لبضعة أيام، أو بضعة أشهر، انعكاسًا لمدى اتساع منطقة الانبعاث (بضعة أيام أو بضعة أشهر ضوئية)، وتكشف أيضًا عن نواة نشيطة، أو عن قرص تجمّع حول ثقب أسود ضخم.

ونلاحظ أنه فى العديد من المراجعات تبدو لنا سرعة التدفقات أعلى من سرعة الضوء: والأمر يخص تدفقات فوق ضوئية. ولكن هذا بالتأكيد ليس سوى ظاهرة بصرية: التدفق الآتى نحونا تضخمه التأثيرات النسبوية كثيرًا. وبشكل خاص فإن الفرق فى أزمنة وصول الفوتونات يكون بقيمة زمن اجتياز تدفق نفسها. وتبث المادة بعد التدفق الضوء الذى يصل بسرعة أكثر نحونا، ويبدو أن تقدم التدفق يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء.

الشكل (٩)

تتصف بعض النوى النشيطة بانبعاث تدفقات من البلازما بالغة السرعة، يمكنها أن ترحل بعيدًا جدًا فى الفضاء، أكثر بعشر مـرات مـن شـعاع المجرة التى تأوى هذه التدفقات. وهنا تدفقات مجـرة كوكبـة الدجاجـة Cygnus A، المرصـودة بالأشـعة الراديويـة المتـصلة بواسـطة Very Large Array (الولايات المتحدة)،

تبعًا لبيرلى Perly وآخرين. (1984, Apj 258, 35)

تكوّن المجرات والثقوب السوداء الضخمة

فى الوقت الراهن، تتيح الحساسية الشديدة التى جاءت بها الأجهزة الضخمة رصد المجرات الأكثر فالأكثر بعدًا بمزيد ومزيد من العمق والارتقاء فى الفـضاء يعود بنا إلى الغوص فى الزمن؛ لأن الضوء الذى يصلنا من تلك المجرات البعيـدة كان قد انبعث منذ زمن سحيق جدًا، عندما كان الكون لا يزال شـابًا (شـكل ١٠، انظر خارج النص). ويمكننا الارتقاء حتى إزاحات نحو الأحمر redshifts بقيمة z = 5 - 6 بواسطة التلسكوب الفضائى هابل والتلسكوبات البـصرية الـضخمة مـن النوع ذى ١٠ متر مثل (Keck, VLT, Gimini...). ويعادل ذلك الارتقـاء إلـى عصر حيث لم يكن الكون يتجاوز ٥ فى المائة من عمره! حيث يُلاحظ حينئـذ أن

عدد المجرات كان أكثر بكثير فى الماضى. وتتكون المجرات بالتفاعل والانـــدماج، بطريقة متسلسلة، ولقد تقلص عددها بمعدل ١٠ مرات على الأقل، بالنسبة للمجرات القزمية، من المجرات الغنية تمامًا بالغاز وكثيـــرة العـــدد ذات الإزاحـــة الطيفيـــة الكبيرة. والأخيرة هى لبنات قاعدة المجرات العملاقة المرصودة فى الوقت الراهن.

وسيناريو التكوين الأكثر قبولاً حاليًا يتمثل فى حدوث هـــالات مـــن المـــادة السوداء تكونت بطريقة متسلسلة، والتى دخلت أيضًا فى تصادم، وكوّنت بالتـــدريج أجسامًا أكثر ضخامة. وتم جذب المادة الباريونية[١٧] (العادية) نحو قاع آبار الجهد بواسطة جاذبية الهالات، وبتبديد المادة السوداء يكوّن الغاز قرصًا مجريًـــا، وتبـــدأ النجوم فى التكوّن انطلاقًا من الغاز.

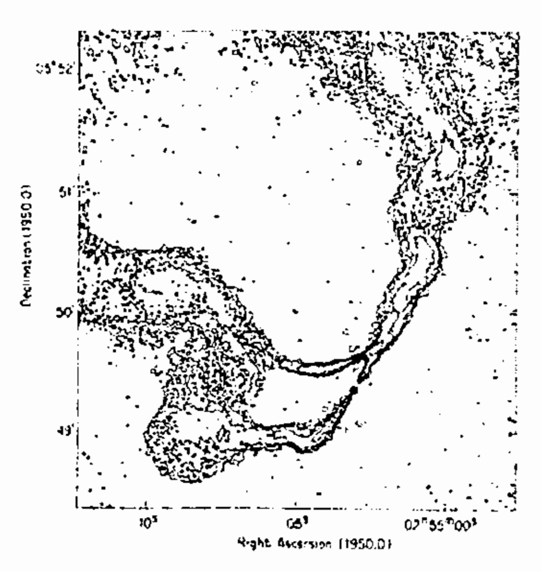
وفى ركام المجرات، يكون تطور المجرات أكثر سرعة، فهنـــاك تفـــاعلات أكثر ويكون خزّان الغاز فى الأجزاء الخارجية قد تبدد. ويمثل ذلك بيئة مـــا هـــو داخل الركام، ما بين المجرات. ويُرصد هذا الغاز شديد السخونة (عدة ملايين مـــن الدرجات) بواسطة الأشعة السينية التى تنبعث منه، ويقود اندماج المجـــرات إلـــى تكوّن أشباه الكرات، التى يكون دورانها أقل بكثير من الأقراص المجريـــة. وتبعًـــا لنسبة الكتلة بين المجرات التى تدخل فى الاندماج، يمكن الحصول على ما يلى:

- إما مجرة إهليلجية، إذا كانت الكتل متماثلة.
- إما مجرة لولبية ببصلة، إذا كانت كتلة المجرة المصاحبة أقل من ثلث المجـــرة الرئيسية.

وفى كل الأحوال يقود الاندماج أيضًا مزيدًا من الغاز نحو المركـــز، حيـــث يسبب جزء منه لهب تكوين نجوم (انفجار نجوم)، ويذهب جزء فـــى المائـــة إلـــى تغذية الثقوب السوداء الضخمة المركزية، التى توجد بالفعل فى كل المجرات.

---

(١٧) الباريون baryon: أى من الأجزاء المتعلقة بالجسيمات الأصغر من الذرة التى تشترك فى التفـــاعلات القوية. تتألف من ثلاثة جزيئات افتراضية (كل منها له شحنة تساوى ثلث أو ثلثى شحنة الإلكتـــرون). وعادة تكون كتلتها أكبر من مجموع تلك الجزيئات الافتراضية مع المضاد لها. (المترجم)



الشكل (١١)

عندما يكون لمجرتين نواة نشيطة فى حالة اندماج، وينتهى وجود الثقبين الأسودين الكبيرين فى المركز بالاندماج، بحيث تضاف كتلتيهما.
وهنا يحدث التفاعل بين نواتين نشيطتين، لكل منهما تدفق راديوى.
(مدار VLA)، تبعًا لأوين Owen وآخرون (Apj, 294, L85)

الثقوب السوداء الثنائية

فى سيناريو تكوين المجرات بالاندماج هذا، هناك مجرة عملاقة فى الوقت الراهن كانت نتيجة عدة (نحو ١٠) اندماجات خلال زمن هابل؛ لذلك من المتوقع العثور على عدد كبير من الاندماجات للثقوب السوداء الضخمة (الشكل ١١). وعندما تندمج المجرات يسقط الثقبان الأسودان الموجودان فى المركز نحو مركز مشترك للجهد، بواسطة الاحتكاك الديناميكى. ثم تكوّن المجرتان منظومة ثنائية، تكون مستقرة خلال زمن محدد، ويعتمد الزمن الكلى لاندماجهما كثيرًا على كثافة النجوم فى المركز. ولا يمكن للثقوب السوداء الثنائية أن تفقد الطاقة إلا بأن تأسر نجما، لتكوين منظومة من ثلاثة أجرام، التى تعمل بعد ذلك على القذف بنجم.

ويكون لذلك النجم عزمًا زاويًا وطاقة، ويتيح لثقبين أسودين بالتقارب. ولكن شيئًا فشيئًا يتم قذف النجوم فى مساراتها الصحيحة، ويجب من جديد الاعتماد على زمن اندماج النجوم (بضع مئات الملايين من السنوات) حتى تقترب الثقوب السوداء. غير أنه إذا طرأ اندماج آخر بين المجرات خلال هذا الزمن، ستكون هناك منظومة من ٣ أجرام مكونة من ثلاثة ثقوب سوداء، وسيتم قذف واحد منها فى الفضاء ما بين المجرات مثل الرمى بالمقلاع. وشيئًا فشيئًا هل ستوجد الثقوب السوداء هائمة منعزلة فى فضاء ما بين المجرات؟

فى الواقع لا تكون المنظومة الثنائية للثقوب السوداء مركّزة تمامًا، لكنها تتكون على الأغلب من ذبذبات صغيرة حول مركز، مما يتيح لها أسر مزيد من النجوم، وأن تندمج بسرعة أكبر. ويتيح ذلك تجنب هرب ثقوب سوداء بين المجرات، ويفسر بشكل جيد وجود ثقوب سوداء بالفعل فى كل المجرات.

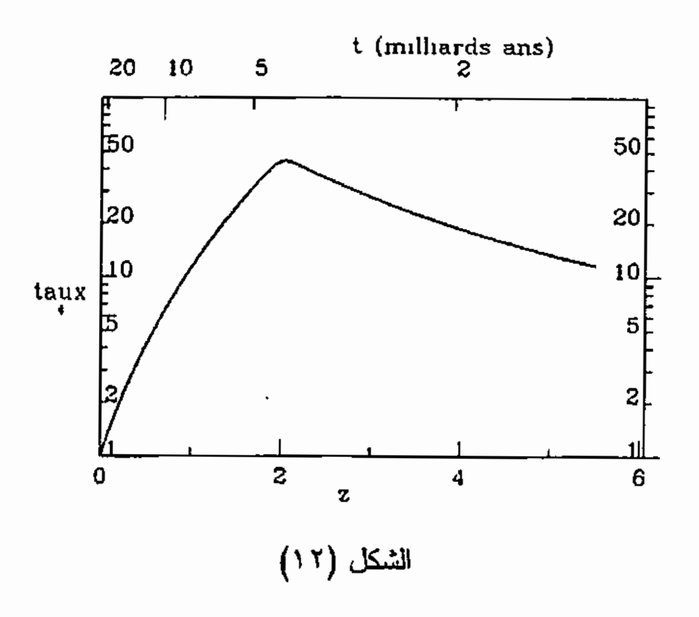
تاريخ تكوّن النجوم

كانت المجرات فى الماضى أكثر عددًا، وكان فيها غاز، وكان الزمن الديناميكى أقصر. وفى الواقع كانت كثافة الفيض أكثر ارتفاعًا بفعل التمدد. وكان مقياس الزمن أكثر سرعة بكثير. عندئذ يمكن أن نتوقع حدًا أقصى لاندماج المجرات $z = 2$ (t = ٤ مليار سنة تقريبًا). وبالمثل فإن الأساسى فى تكوّن النجوم، ونشاط الكوازارات، لابد أنه حدث فى ذلك العصر. ويتوافق ذلك بإحكام مع الأرصاد (الشكل ١٢).

والخلاصة أن بعثة الأرصاد الحديث تتيح لنا أن نأخذ فى اعتبارنا أن المجرات هى منظومات فى حالة تطور تام، ودائمًا غير مستقرة. تتكون الأقراص فى البداية لكنها تُدمر أيضًا بسرعة كبيرة، عند التطور العريق فى القدم، أو عند التفاعلات والاندماجات بين المجرات. تتكون بصلات أو شبه كرات بالتدريج. وتمثل الحالة النهائية لتركز المادة، وتكون قد تكونت من النجوم القديمة، وليس فيها

غاز. والمجرة التي تكون قد استنفدت كل غازها تكون بشكل ما متصلبة في تطورها، ويتطلب الأمر تجمع غاز خارجي لتجاوز هذه الحالة (اندماج بين المجرات مثلاً).

تتكون الثقوب السوداء الضخمة بآلية تضخم البصلات نفسها: بسقوط الغاز والمادة في المركز، وبالتطور المتصل للأقراص (حواجز، لوالب) وبواسطة الاضطرابات الخارجية (الاندماج). حينئذ يكون من الطبيعي أن نجد علاقة تناسبية بين كتلة الثقوب السوداء وكتلة البصلة في كل مجرة، وتتطور المجرات بسرعات مختلفة، وتكون أعلى بكثير في ركام المجرات، الذي تحفزه التفاعلات مع الجيران.



الشكل (١٢)

تاريخ تكوّن النجوم في الكون.
نسبة تكوّن النجوم تجتاز حد أقصى نحو العصر z = 2؛
أي عندما كان الكون في ٢٠ في المائة من عمره الحالي.
(تبعًا لمدو وآخرون 1996, MNRAS 282, 1388)

الباب الخامس

الأرض والمحيطات والمناخ

تبريد الأرض[1]

بقلم جان-لوى لو مويبه

Jean-Louis LE MOUEL

ترجمة: عزت عامر

مقدمة

اقترح علىّ منظمو هذه السلسلة من المحاضرات أن أتكلم عن تكوّن وتطور الأرض، وكان ذلك موضوعًا بالغ الاتساع لم أكن متأكدًا من قدرتى على معالجة جوانبه المتعددة بكل الكفاءة المرغوب فيها. حينئذ قررت، بموافقتهم، أن أقتصر على التطور الحرارى للكوكب، وعلى تبريده، بما أن الأمر كذلك. فى هذه الحالة فإن الموضوع المحدود هو بالتأكيد أقل إثارة، ولكن كان لدىّ لصالح هذا الاختيار أسباب ثلاثة على الأقل:

- اكتشفت مرات عدة أنه يساء فهمه، حتى من قبل بعض العلماء.

- يواجه التاريخ الحرارى للأرض مسائل أساسية أيضًا، مثل تلك المتعلقة بعمرها وبالطاقة التى تتيح لماكينة الأرض المحافظة على ظواهر تبديد، مثل المجال المغناطيسى الأرضى وحركة صفائح القشرة الأرضية.

- عملت قليلاً فى هذا المجال.

ولكن هناك تحذيرًا فى البداية. سوف أتحدث عن تبريد الأرض الصلبة. وأحوال درجة الحرارة على سطح الأرض يحددها تفاعل الإشعاع الشمسى والمناخ. وفيض الطاقة القادم من الشمس على هيئة إشعاع أكثر ألف مرة من فيض الحرارة الداخلى، الخارج من الأرض الصلبة، الذى سوف أتحدث عنه بعد قليل.

---

(١) نص المحاضرة رقم ١٩٦ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٤ يوليو ٢٠٠٠.

وفيما بعد عَرْضه سوف أفترض أن درجة حرارة سطح الكرة الأرضـية محـددة وثابتة ويساوى °0 (صفر درجة مئوية)، طوال الجزء الأكبر من تاريخها.

ومسألة برودة الأرض من تلك المسائل التى يتم وضعها ضمن فئة المسائل القديمة، وهو ما يعنى بلاشك أنها من المسائل التى تحوز الاهتمام منذ قرون، ولكن أيضًا حلها لم يتم الحصول عليه بعد. وبشكل عارض أن شخصيات مهمة كان يشغلها توضيح هذه المسألة.

وما نعرفه منذ العصور القديمة، منذ حفر المناجم الأولى، أن درجة الحرارة تزداد مع التعمق فى الطبقات السطحية للأرض بنحو °3 مئوية لكل ١٠٠ م. وأدت هذه الملاحظة، كما يمكنك أن تتصور، إلى تفسيرات متعددة، قد تكون غير معقولة إلى حد ما أحيانًا، وهو ما لن أسترجعه. ولم يحدث سوى فى القرن التاسع عشر أن أتاحت نظرية الحرارة لفورييه Fourier الربط بشكل كمي بين الحرارة التى تفقدها الأرض وزيادة درجة الحرارة مع العمق التى يطلق عليها التغير التدريجى الحرارى الجوفى geothermique. وفضلاً عن ذلك كان فورييه مهتمًا بشكل مباشر تمامًا بمسألة درجات الحرارة التى، كما يقول، "تبدو لنا دائمًا كأحد موضوعات الدراسات الكونية المهمة، والتى نراها بشكل خاص عند تأسيس نظرية رياضية للحرارة. ومنذ بداية أبحاثنا كانت لدينا الرغبة فى معرفة قانون درجات الحرارة داخل كرة صلبة تم تسخينها فى البدء بغمرها فى وسط (ساخن) ثم نُقلت إلى وسط بارد". (١٨٢٤).

وقبل تقديم نموذج كلفن Kelvin الشهير، القائم على نظرية فورييه، سوف أقول كلمة عن عمل سابق لبوفون Buffon، فى ١٧٥٥. لقد حاول بوفون، فى الواقع، أن يجيب بالتجربة عن هذا السؤال نفسه الذى وجب على فورييه تقديمه بعد ٧٠ سنة فى الأزمنة التى استرجعتها توًا، بهدف إعلان تقدير لعمر الأرض.

وكان على بوفون أن يصنع كرات من الحديد المطروق (ومواد أخرى) ذات أقطار مختلفة (من نصف بوصة إلى ٥ بوصات) ثم قام بتسخينها فى مسابك حديد

حتى وصلت إلى اللون الأبيض. وعندئذ قاس الزمن t_1 الذى استغرقته الكرة لكى تبرد حتى يمكن لمسها باليد، والزمن t_2 الضرورى حتى تصل إلى درجة حرارة الجو المحيط بها، وأخذ الزمنين t_1 وt_2 بالنسبة لقطر الكرات ووجد علاقة خطية بين هذه البارامترات. وأقدم خلاصة بوفون (المجازفة تمامًا، تغييره للمقياس لم يكن مشروعًا):

"إذا افترضنا، كما يبدو أن كل الظواهر تشير إليه، أن الأرض كانت فى الماضى فى حالة تسيّل بسبب النار، ولقد أثبتت تجاربنا أنه لو أن الكرة الأرضية كانت متكونة بكاملها من النار أو من مادة محتوية على الحديد، لم يكن لها أن تتصلب حتى المركز سوى فى ٤٠٢٦ سنة، وتبرد حتى نقطة يمكن لمسها عندها بدون أن تحترق اليد فى ٤٦٩٩١ سنة، وتبرد إلى حد درجة الحرارة الحالية إلا فى ١٠٠٦٩٦ سنة...".

ولقد اختزل بوفون قليلاً هذا التقدير، لكى يضع فى الحسبان أن الأرض تكون غالبًا متكونة من مواد "زجاجية وجيرية"، إلى ٧٥٠٠٠ سنة.

نموذج كلفن (١٨٦٢)

كان الأمر فى حاجة إلى مزيد من الدراسة. ولإدراك كل أهمية الموضوع، كان من الواجب وضعه من جديد فى جدل الأفكار الهائل والعنيف لتنشيط جيولوجيا القرن التاسع عشر: الصراع بين أنصار التوافقية uniformitarisme وأنصار الكارثية catastrophisme، حول الزمن الدائرى والزمن السهمى، بين مؤيدى التسلسل الزمنى الطويل والتسلسل الزمنى القصير. وكلفن نفسه، ولم يكن يخلو من أية نية فى الغطرسة، اهتم فى الموضوع بالقواعد الأساسية للفيزياء، التى تتضمن حفظ الطاقة: "تفقد الأرض حرارة باستمرار، كذلك تثبت حفظ التغير التدريجى الحرارى الجوفى، وفكرة النشاط الجيولوجى الدورى غير معقولة، ويجب أن يكون هذا النشاط بالعكس فى تناقص باطراد مع الزمن".

وبناء عليه فيما يلى حساب اللورد كلفن، حيث يبدأ من قيمة مقاسة للتغير التدريجى الحرارى الجوفى ، فلنفترضه 1° درجة مئوية لكل ٣٣ م. وفى لحظة البداية $t = 0$ والوسط (الكرة الأرضية، لكن فى كلفن فى حسابه أجرى تقريبًا مشروعًا لنموذج مسطح) يكون فى درجة حرارة متماثلة تساوى درجة حرارة الاندماج T_g، التى اعتبرها مساوية لدرجة 3800° مئوية. ثم ترك كلفن ببساطة الأرض - الكرة - تبرد، بأن تشع الحرارة فى الفضاء، وتكون درجة الحرارة على سطح الكرة الأرضية، كما أشرت سابقًا، $T = 0$ درجة مئوية (الشكل ١).

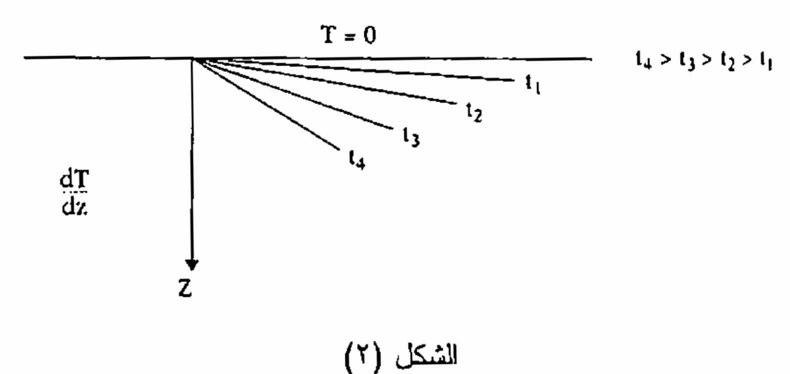
$T = 0$

$T = T_g$ $\qquad$ $T = 0$ $\qquad$ $t = 0$

$T = T_g$

الشكل (١)

وبالنسبة للقيم الصغيرة للزمن فإن قيمة التغير التدريجى الحرارى الجوفى (dT/dx) سيرتفع إلى حد كبير، ثم يتناقص كلما بردت الطبقة ببث حرارة الداخل نحو السطح المنطلق لزيادة سمك القشرة الأرضية (الشكل ٢).



الشكل (٢)

وبعد زمن معين كانت قيمة التغير التدريجي فى النموذج، أى ميل المستقيم الذى يمثل درجة الحرارة تبعًا للعمق - بجوار السطح، هى قيمة التغير التدريجى الحرارى الجوفى الملاحظ فى الوقت الراهن g_0. ومن السهل حساب هذا الزمن t.

ويكون: T (عمر الأرض الذى نحصل عليه من النموذج) = $\pi K g^2_0 / T^2_g$

وأنبه إلى أن Tg = ٣٨٠٠ درجة مئوية وأن g_0 = ١ درجة مئوية لكل ٣٣ م. وk هو الانبعاث الحرارى، نسبة التوصيل الحرارى على حاصل ضرب الكثافة فى الحرارة النوعية. ويتم قياسه بالنسبة لصخور القشرة، ولنأخذ مثلاً كلفن $k = 1{,}2\ 10^{-6}\ m^2\ s^{-1}$ وتكون النتيجة: $t = 100.10^6$ سنة

لم تكن الأرض إذًا على هذه الدرجة من القدم كما كان يظن الجيولوجيون التوافقيون، أنصار الزمن الدورى.. ويجب أن أمر على المناقشات الطويلة التالية، حول التحسين الذى جرى فى عمر النموذج هذا، والذى تم أحيانًا بواسطة كلفن نفسه.

لماذا كان تقدير عمر الأرض الذى قدمه كلفن خاطئًا؟ الرأى الذى ساد، حتى لدى العديد من العلماء، والجيولوجيين أحيانًا، أن كلفن لم يستطع أن يدخل فى حسابه انبعاث الحرارة المشعة فى صخور الكساء - الذى سأعود إليه - حيث إن النشاط الإشعاعى لم يكن قد تم اكتشافه بعد. وليس هذا هو السبب، فإن إدخال انبعاث الحرارة المشعة لا يغير التقدير كثيرًا. والسبب أن كلفن اعتبر أن الحرارة الداخلية للأرض تُصرف بعملية "التوصيل" فقط. وفى الحقيقية فإن العنصر الرئيسى فى هذا الانتقال فى الكساء الأرضى هو "الحمل"، وهو أكثر فعالية بكثير. لكن إذا أمكن القول فإنه إذا أخذنا فى اعتبارنا هذا النوع القوى من نقل الحرارة ألا وهو الحمل، ألا يكون تبريد الأرض أكثر سرعة، وألا نجد أن قيمة عمرها أقل كثيرًا أيضًا عن ذلك الذى تعطيه نظرية التوصيل لكلفن؟ وهذا إغفال لأساس حسابه. يقلل التغير التدريجى الحرارى الجوفى فى الطبقات السطحية للأرض حتى يصل إلى بضع مئات الملايين من السنوات فقط، قيمة ٣٣ درجة مئوية لكل كيلومتر؛ لأن الكمية

الهائلة من الحرارة المخزونة فى الطبقات الأكثر عمقًا لا يمكنها، بالتوصيل فقط، أن تصل قريبًا من السطح لتغذية هذا التغير التدريجى الحرارى الجوفى، الذى يتـــدهور. أما الحمل، فى حد ذاته، فإنه قادر على ضمان هذا النقل.

لم يتجاهل كلفن بوضوح الحمل، الذى كان معروفًا منذ ليوناردو دافنـــشى، والذى حلله فورييه بشكل جيد، ومن السهل ملاحظته فى الجو أو فى قدر من الماء يجرى تسخينه. ولكن لم يكن أحد يفترض حينئذ أن الكساء الأرضـــى، المعـــروف بأنه صلب، والذى كانت تصفه الحسابات حتى حسابات كلفـــن، رغـــم ملاحظـــة ظواهر المد والجزر، صلابة أعلى من صلابة الفولاذ، يمكن تنـــشيطه بتحركـــات الحمل. وذلك أيضًا تأثير الفترات الزمنية الطويلة: السيليكات المتبلورة فى الكساء، مع أن لها صلابة الفولاذ بالنسبة لدوام الأزمنة القصيرة، وتسيلُ بالنـــسبة لمقيـــاس الأزمنة الجيولوجية، فإنها تسلك مثل السوائل عالية اللزوجة. وماذا نظن فى تـــسيّل الجبال والأنهار الجليدية أو سيلان بعض المواد، التى تستجيب مع ذلـــك بطريقـــة مرنة للتغيرات السريعة للإجهاد (بولمرات مرنة).[٢]

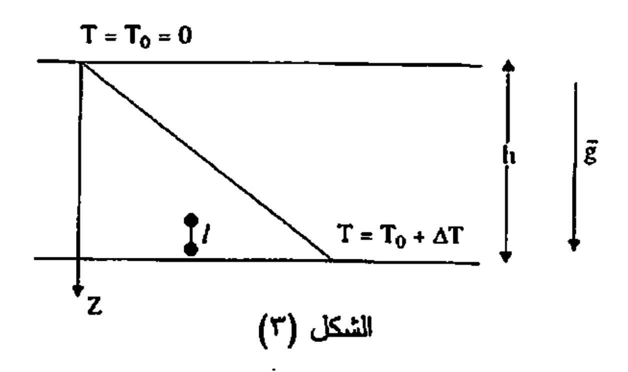
الحمل

الحمل موجود فى كل مكان فى الطبيعة، وهو المحـــرك العـــام للطبيعيـــات الأرضية، لنواة المحيط ونواة الغلاف الجوى.ويمكن الرجوع أيضًا إلى فورييه فى الوصف الذى قدمه فى ١٨٢٤: "فى المحيط والبحيرات تتجـــه الجزيئـــات الأكثـــر برودة، أو بالأحرى التى تكون كثافتها أكثر ارتفاعًا، بشكل دائـــم نحـــو المنـــاطق الأقل، ويجب أن تكون تحركات الحرارة لهذا السبب أكثر سرعة بكثير مـــن تلـــك الجزيئات التى وُجدت فى الكتل الصلبة بمقتضى خاصية التوصيل". كل شىء قيل، أو قيل تقريبًا.

---

(٢) بولمرات مرنة elastomeres: كلمة مركبة من مـــرن elastique وبـــوليمر polymere وهـــى مـــادة كاوتشوك اصطناعية (مطاط) يتم الحصول عليها بالبلمرة. (المترجم)

سوف أستعيد باختصار بضع ملاحظات أساسية تتصل بالحمل بأخذ مثال بسيط، لكنه ملائم، لطبقة متماثلة ذات سمك h تم تسخينها من أسفل. وسوف نفترض أنها تمثل الكساء الأرضى (الشكل ٣).



الشكل (٣)

شروط الحمل

تكون درجة حرارة السطح $T_0 = 0\,^0c$، ودرجة الحرارة أسفل الطبقة $T + \Delta T$ (عند حد الكساء – النواة FNM)، و z الخط الرأسى الهابط. إذا كانت الطبقة لا تحمل – إذا كانت من الجانب الأساسى صلبة تمامًا – فإنها تستقر هناك، فى حالة نظام ثابت، تغير تدريجى فى درجة الحرارة، ميل، تماثلات، $DT/dz = \Delta T/h$ نفترض الآن أن جزيئًا، حجمًا صغيرًا من سائل، وبالتالى يتصف ببعض من عدم الاستقرار، رغم عمق حد الكساء – النواة، يعلو إلى الارتفاع l. إذا ارتفع هذا الحجم بالسرعة الكافية، نظرًا إلى تباطؤ انتقالات الحرارة بالتوصيل، الذى سبقت الإشارة إليه، فإنه لن يتبادل الحرارة مع ما يحيط به خلال الارتفاع، ويقال إنه سوف يرتفع بشكل كاظم للحرارة adiabatique. حينئذ يبرد بالتراخى كاظم الحرارة حيث إنه فى وضعه الجديد، عند الارتفاع l، يكون الضغط (الهيدروستاتيكى) أكثر ضآلة، لكن درجة حرارة ما يجاوره تكون أيضًا أكثر ضآلة، بموجب التغير التدريجى T/h الذى يسيطر على الطبقة. ويتناسب التبريد عند

التراخى مع التغير فى الضغط الذى يميز الجزئ، الذى يتناسب هو نفسه مع l:

$$\delta T_a = (dT/dz)_a l$$

$$\delta T_{env} = (dT/dz)_{env} l = T/h\, l$$

Env تشير إلى البيئة

من هنا إذا كان

$$(dT/dz)_a < \Delta t/h$$

ويواصل الجزئ، الذى يعتبر أكثر خفة من بيئته؛ لأنه أقل برودة، الصعود، وينطلق الحمل، وهو الذى يهبط فى الحالة العكسية، وتنتقل الحرارة بالتوصيل. ومن السهل حساب قيمة التغيير التدرجى الحرارى الجوفى، فهو الكمية التى يبرد بها حجم من السائل عندما يرتفع من متر بسبب تغير الضغط المصاحب لهذا الارتفاع:

$$(dT/dz)_a = g\, \alpha\, T/ C_p$$

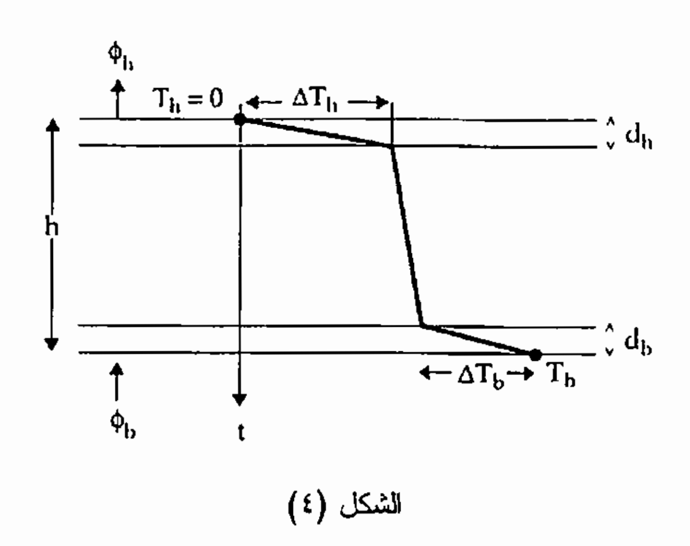
و g هو تعجيل الثقل، و α هو معامل التمدد الحرارى، و T درجة الحرارة فى نقطة معينة، و C_p هى الحرارة النوعية. وهو ما سوف أعطيه قيمًا بعد قليل. والأحوال كاظمة الحرارة بشكل فائق superadiabacite تظل ضرورية. وهناك تأثيرات مناوئة تعارض الحمل، وبشكل خاصة قوة اللزوجة. ويجب أن تتغلب قوة أرشميدس على التأثيرات المناوئة، تلك التى تعبر عنها الحالة:

$$R_a = g\, \alpha\, h^3/vk > R_c$$

حيث R_a هى عدد رايليف Rayleigh (و v اللزوجة، وهى الكمية التى تقيس مقاومة السيلان). و R_c عدد رايليف الحرج، ومقداره ٢٠٠٠. وبمجرد أن يتم الحمل فى السائل، تكون الحرارة المنقولة بالتوصيل مهملة. وفى الحجم المُنشط بواسطة الحمل، يظل التغير التدريجى لدرجة الحرارة دائمًا قريبًا جدًا من تغير التدريج الكاظم للحرارة.

طبقات محدودة حراريًا

على حدود سائلين لا يمتزجان، لا تستطيع الحرارة أن تنتقل بواسطة فيض المادة بواسطة الحمل، وتنتقل من سائل إلى الآخر، دائمًا، بواسطة التوصيل، عبر طبقات تسمى الطبقات المحدودة حراريًا. ولنفترض مثالاً صفيحة رقيقة يتم تسخينها من أسفل (الشكل ٤)



الشكل (٤)

نحصل على الفيض الحرارى عبر الطبقات الحرارية بواسطة القانون الأول لفورييه، مثل:

$$\Phi_\eta \quad = \Phi_b = \Phi = k \; Dt/dz = k \; \Delta \, T_h/d_h = k \; \Delta \, T_b/d_b$$

(فى حالة النظام الثابت،كل الحرارة التى تدخل فى الصفيحة تخرج منها)، و k هى التوصيلية الحرارية conductivite thermique.

التاريخ الحرارى للأرض
(وهو ما نجده فى الوقت الراهن)

كانت محاولة كلفن حساب عمر الأرض بنموذج فيزيائى هى الأخيرة. وفى ١٨٩٦ اكتشف بيكيريل Becquerel النشاط الإشعاعى، ومنذ ١٩١٧، كانت مناهج تعيين تاريخ المواد المشعة قد أتاحت معرفة العمر القطعى – على الرغم من أنـــه أيضًا غير دقيق – للعديد من المراحل الجيلوجية. وللتوصل إلـــى عمـــر النيـــازك وعمر الأرض، كان لابد من الانتظار حتى ١٩٥٦ وانتظار أعمـــال باترســـون Patterson. وهذا العمر هو ٤,٥٥ ×١٠^٩ سنة. ولن أقدم شيئًا عن تلك المغـــامرة العظيمة التى تتمثل فى اكتشاف مناهج تعيين تاريخ المـــواد المـــشعة ولا النتـــائج الهائلة لها، وأعود إلى موضوعى، ألا وهو تبريد الأرض. وكما هو الحال بالنسبة لكل مشاكل التطور الحرارى، يجب إعطاء حالة أولية. وفى الحالة الراهنة، لـــيس هذا أمرًا سهلاً.

تكوّن الأرض

للوصول إلى هذا الهدف، ولو بالتقريب، يجب أن أتناول الأشياء فى بـــدايتها وأستعيد عملية تكوّن الأرض. وسوف أقتصر على إعطاء وصف مختصر، بـــدون مناقضة الاحتمالات المختلفة. منـــذ ٤,٥٥ × ١٠^٩ ســـنة، تكونـــت الأرض، مثـــل الكواكب الأخرى، بتجمع مادة السديم الشمسى البدائى، فـــى ســـحابة غازيـــة فـــى البداية، ثم أصبحت سحابة غاز وغبار على درجة من التكثّف أدت إلـــى البـــرودة، وهذه المادة هى المادة نفسها التى تكونت منها نيـــازك الكونـــدوريت chondrites، وهى النيازك الأكثر انتشارًا بين تلك التى تسقط على الأرض، وهى تتكـــون مـــن جمادات سيليكات وحديد طبيعى. وتتجمع الحبيبات الكوندوريتية لتعطـــى كريـــات تتجمع لتكوين كتل أكثر ضخامة، كويكبات، أجنة كواكب.. وحـــدث أن تـــصادمت هذه الأجرام، التى تدور حول الشمس، وانسحقت وتلاحمـــت....وهكـــذا تكونـــت الأرض واقترب نصف قطرها إلى ما هو عليه فى الوقت الحـــالى خـــلال بـــضع

عشرات الملايين من السنين (ويتم الحصول على هذا التقدير بالحساب القائم على نماذج التجمع accretion). وفى نهاية تلك المرحلة الأولى كانت الأرض ذات تركيب متجانس، حيث كان فى كل المكان النسب المئوية نفسها من السيليكات والحديد والماء. ماذا كان توزيع درجة الحرارة حينئذ؟ وبالطبع قدمت عملية التجمع الحرارة، وفى الواقع تحول جزء كبير من طاقة الجاذبية والطاقة الحركية للكرات والكتل والكويكبات، التى تصادمت، إلى حرارة. ولهذا السبب ليس التقدير الدقيق لدرجة الحرارة التى سادت فى نهاية مرحلة التجمع أمرًا سهلاً. وربما كانت الأرض فى حد ذاتها منصهرة، وربما كانت هى نفسها منصهرة جزئيًا (وسبب ذلك أن درجة حرارة الاندماج تزداد مع الضغط، أى مع العمق). وفى كل الأحوال فإنها كانت ساخنة - وسوف أعطى أرقامًا بعد قليل. لكن هنا لم تكن قد حدثت بعد مرحلتى الأولية؛ لأنه على الفور تتكون النواة بواسطة التمايز. فالحديد الأكثر ثقلاً، يرتحل إلى المركز، ويحدث له ترشيح من خلال الحبيبات الصلبة للسيليكات (وأسترجع هنا أن الكوكب لم يكن مصهورًا بكامله). ولا يتعلق الأمر بالحديد الخالص، ولكن خليطًا من الحديد - الكبريت، أو حديد - أكسجين أو حديد - سيليكات، وهو أقل كثافة من الحديد الخالص، وتكون درجة حرارة الاندماج فيه أكثر انخفاضًا. وتحرر عملية التمايز هذه الكثير من الطاقة: تتجه جزيئات الحديد، الأكثر كثافة، نحو المركز حيث الجهد الجاذبى أكثر ضآلة، محررة طاقة جاذبية، وحيث ارتفاع درجة الحرارة التى تعتمد بالتالى على سرعة العملية. وعلينا أن نقر بأن هذه العملية تكتمل فى بضع عشرات الملايين من السنوات وأنها لا تصهر الكوكب بشكل كامل (وتقدير ٢٠٠٠ درجة مئوية لرفع درجة الحرارة المتوسطة للأرض الناتجة عن تمايز النواة يكون مغال فيه كثيرًا). ويجب أن نضيف قصفًا كثيفًا من النيازك. وربما أنه فى نهاية هذه المرحلة كان قد انصهر غلاف خارجى من الكساء، سمكه بضع عشرات الكيلومترات، والنواة المعدنية كلها.

لكن الحمل قوى، وبردت الطبقة الخارجية، وسنجد أنفسنا بعد ذلك بقليل - نفترض أنه منذ ٤,٢ مليار سنة - فى موقف لا يبتعد كثيرًا عن الموقف الراهن،

كساء صلب - بالمعنى الذى ناقشته سابقًا، يسلك كما سائل لزج علـــى مـــستويات الأزمنة الجيولوجية - ونواة معدنية منـــصهرة بالكامـــل. ونفتـــرض أن التـــاريخ الحرارى للكوكب يبدأ من هذه المرحلة.

التاريخ الحرارى للأرض

خلال الأربعة مليارات سنة الأخيرة

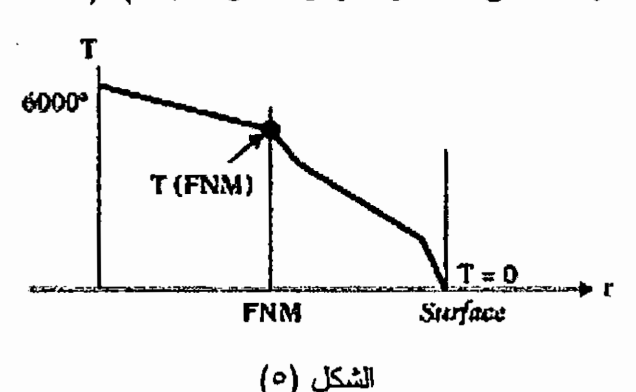
النواة منصهرة، ودرجة الحرارة فى مركز الأرض أعلى من درجة حـــرارة اندماج الحديد (خليط حديد - عناصر خفيفة) عند الضغط السائد، ويمكـــن تقـــدير درجة الحرارة ب ٥٥٠٠ درجة مئوية. ومن ثم فإننا نختار:

$$T_0\,(0) > 5500\,^0C$$

(سوف أعود إلى ذلك، بتغيير تلك القيمة لتعادل إزاحة فى الزمن). وتنتقـــل حرارة النواة بالحمل، وتتوزع درجة الحرارة فيها تبعًا للتغير التـــدريجى الكـــاظم للحرارة، الذى يمكن تقديره بأنه:

$$(dT/dz)_{a.\ noyau}\quad - 0{,}2\,^0C/km$$

وهكذا كانت درجة الحرارة ثابتة عند حد الكساء - النـــواة FNM (هنـــاك طبقة محدودة موصلة على قمة النواة، وهو ما سوف نهمله). (الشكل ٥)



الشكل (٥)

وبالنسبة للكساء في هذه الحالة، فإن المشكلة مطروحة كذلك: يتم حساب التطور الحراري لغلاف سائل شديد اللزوجة يتبادل الحرارة بالحمل (رقم رايليف أكبر من ١٠ ^٦^)، وتكون درجة حرارته معروفة أعلاه وأدناه. والطبقة المحدودة العلوية هي القشرة الأرضية لبنائية(٣) الصفائح، بسمك نحو ١٠٠ كم، والطبقة المحدودة السفلية هي الطبقة D`` للزلازل بسمك نحو ٢٠٠ كم (تتميز بعدم الانتظام الملحوظ لسرعة الموجات الزلزالية).

ولكن يجب إضافة شيئًا ما إلى عرض المشكلة: يحتوي الكساء - المتكون من السيليكات والأكسيدات، وهو ما أنبه إليه - على عناصر مشعة - أورانيوم ٢٣٨ (دوام حياته ٤,٥ مليار سنة) و٢٣٥ (دوام حياته ٧١٠ مليون سنة)، والثوريوم ٢٣٢ (دوام حياته ١٤ مليار سنة) والبوتاسيوم ٤٠ (دوام حياته ١,٣ مليار سنة) - التي يجيد علماء كيمياء الأرض تقدير غزارتها الأولية (مع هامش عدم تأكد غير قليل) التي تقدر ببضع عشرات الأجزاء لكل مليار. وينتج إطلاقًا لحرارة داخلية، يعبر عنها ب وات / متر مكعب، والتي تعدل بارامترات الحمل. ونلاحظ أن هذه العناصر المشعة كانت أكثر غزارة بكثير منذ ٤,٢ × ١٠^٩^ سنة مقارنة بما هي عليه في الوقت الراهن، حوالي عشرة أضعاف.

ويعتبر حساب الحمل في الكساء صعبًا، ويتم إجراؤه في الوقت الراهن بمساعدة رموز رقمية كثيرة. وأقدم لكم توضيحًا لحسابات س. لابروس S. Labrosse من مختبرنا للمغناطيسية الأرضية التابع ل IPG بباريس (الشكل ٦، انظر خارج النص). وسوف تلاحظون أن انتقال الحرارة نحو الارتفاع يحدث بالأخص بهبوط خلطات باردة، بالأخضر (مصحوبة، بوضوح، بارتفاع أكثر انتشارًا لمادة ساخنة). وتتيح نماذج الحمل هذه حساب، في كل عصر، للقيمة المتوسطة (في زمن مقداره عشرات ملايين السنين) لتدفق الحرارة الخارجة من الأرض، والقيمة المتوسطة (خلال الفترة الزمنية نفسها) لدرجة الحرارة في نقطة

---

(٣) البنائية tectonique: قسم من علم الأرض يبحث في عملية التشويه التي تغير شكل قشرة الأرض محدثة الجبال والصخور. (المترجم)

متوسطة فى الطبقة التى تنتقل فيها الحرارة بالحمل. ومن ثم فإن كل شىء محـــدد. والحل المتوسط وحيد لعدد راليف ونسبة تسخين إشعاعى محددين. ورغـــم تعقـــد الحمل، فإن التغير التدريجى لدرجة الحرارة فى جزء الكساء الذى يشهد الحمل، فى داخل الطبقات المحدودة الحرارية، قريب من التغير التدريجى كاظم الحرارة:

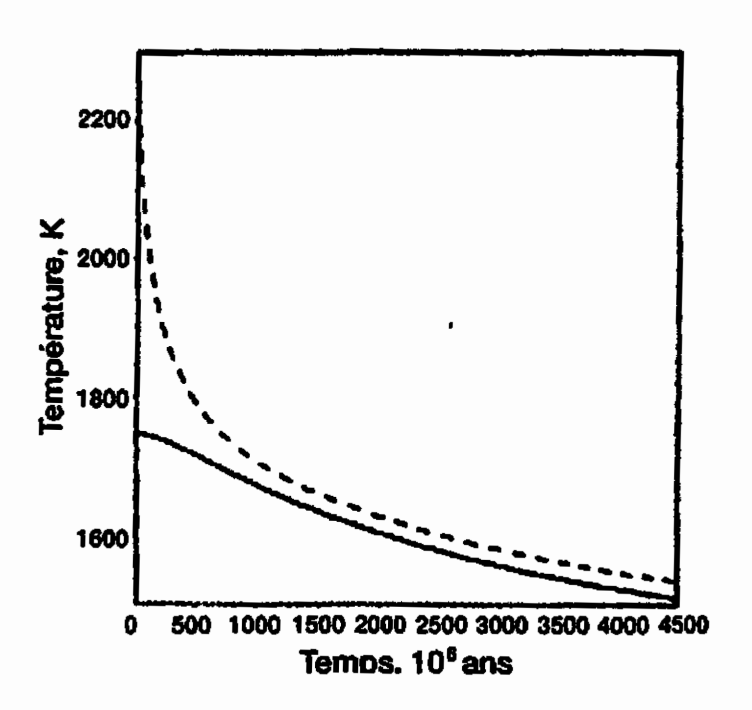
$$(dT/dz)_{a.\ manteau} - 0,3\ ^0C/km$$

وتلاحظ أن هذا التغير التدريجى أقل ١٠٠ مـــرة مـــن التغيـــر التـــدريجى الحرارى الجوفى الذى يُقاس بالقرب من السطح، فى ذروة الطبقة المحدودة حراريًا العلوية التى تنتقل عبرها الحرارة بواسطة التوصيل.

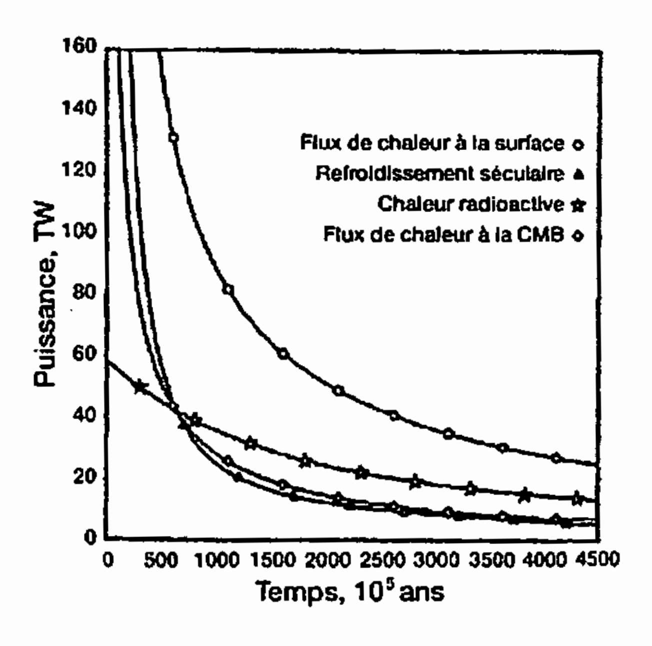
وفى الواقع، يتم عمل سلسلة من الحسابات شبه – ثابتة، بـــأن نأخـــذ فـــى اعتبارنا أن التسخين المشع وعدد رايليف ينخفضان (كثيرًا) خلال الـــزمن. وهـــذا يحدث للتسخين المشع لأسباب واضحة، ولعدد رايليف لأن اللزوجة توجد كما هـــو موضح فى مقام الكسر وأنه يزداد عندما تنخفض درجة الحرارة، تبعًا لقانون أسّى فى A/T، يطلق عليه قانون الحفز activation.

وهنا أصل للنتائج، الموضحة بالشكلين التوضيحيين. يوضح المنحنـــى فـــى الشكل ٧ تحرك درجة الحرارة إلى T_hعند قاعدة القشرة الأرضية (الطبقة المحدودة الخارجية، وبالضرب فى ١,٣ نحصل على درجة الحرارة المتوسطة للكـــساء T). ونلاحظ أن درجة الحرارة هذه لم تنخفض إلا بقيمة ٣٠٠ درجة مئوية خـــلال ٤,٣ مليار سنة. ويقدم الشكل الثانى (شكل ٨) تطور تدفق الحرارة على سطح كوكـــب الأرض، من لحظة البداية المختارة حتى وقتنا الراهن، ويتم تحليلـــه إلـــى ثلاثـــة أجزاء: مساهمة التبريد القديم للنواة (وهذا هو الفيض الذى يخترق حـــد الكـــساء – النواة FNM)، ومساهمة إطلاق حرارة إشعاعية فى الكساء، وذلك الجزء المتعلـــق بتبريد الكساء؛ حيث إنه يبرد أيضًا، وهو أمر غريب، فهذا أمر يُنسى غالبًا. وفيض الحرارة فى الوقت الراهن الناتج عن التبريد القديم (النواة + الكساء) يساوى بقـــدر ملموس إطلاق الحرارة المشعة.

ولكن ليس الأمر هنا سوى نموذج له الكثير من الضعف. وعلى الأقل من الواجب مقارنة هذه التنبؤات بالأرصاد المتاحة. وأمامنا "القيدان" الرئيسيان (الشكل ٧) و(الشكل ٨).



الشكل (٧)



الشكل (٨)

البذرة

نعرف من علم الزلازل أن بذرة graine داخلية، نصف قطرها يساوى ١٢٠٠ كم، فى حالة صلبة. لذلك لابد أن درجة الحرارة فى مركز الأرض خلال تاريخها الحرارى قد انخفضت تحت درجة حرارة اندماج خليط امتزاج الحديد – العناصر الخفيفة (ميل المنحنى الذى يمثل درجة حرارة الاندماج بالنسبة إلى الضغط يكون أكثر شدة من ميل الخط البيانى كاظم الحرارة)، حتى أن البذرة الصلبة بدأت فى هذه الحالة فى التكوّن، واستطاعت أن تنمو حتى وصل نصف قطرها فى الوقت الراهن إلى ١٢٠٠ كم. ومن السهل إلى درجة كبيرة تنفيذ هذا القيد، فيكفى التلاعب بقيمة T_0 (0)، درجة الحرارة الابتدائية فى المركز التى قلت عنها فقط إنها يجب أن تكون أكبر من ٥٥٠٠ درجة مئوية، ويمكن أخذ قيمة لها ٧٠٠٠ درجة مئوية. ولكن بهذه القيمة من الواضح أن البذرة الصلبة تكون "شابة"،

حتى أنه لا يمكن أن تكون قد بدأت فى التكوّن إلا منذ ٢ × ١٠٩ سنة (إلا إذا كان نصف قطرها الراهن كبير جدًا). لذلك نجد أنه بعد منعطف طويل نعود إلى حساب "بالكلفن" لنحدد ليس فقط عمر الأرض، ولكن بشكل أكثر تواضع بكثير، عمر البذرة. ولا يوجد أى مقياس مباشر فى الوقت الراهن يتيح الحصول على تاريخ ميلاد البذرة.

فيض الحرارة الحالى

يتم قياس فيض الحرارة الذى يفلت فى الوقت الراهن من الأرض، ولهذا الغرض يتم التطبيق الحرفى للصيغة الأولى لفوربيه: نقيس الفرق فى درجة الحرارة T بين نقطتين متباعدتين بمقدار h تبعًا للعمودى، ونحصل على:

$\Phi = k \, \Delta T/h$ بالوات لكل متر مربع.

K هو الموصلية الحرارية للصخرة التى صنعنا فيها ثقبًا. وهذه القياسات لفيض الحرارة متعددة فى الوقت الراهن، إلا أنها غير كافية، ويتم توزيعها بشكل غير منتظم على سطح كوكب الأرض. فإذا أردنا الحصول على متوسط قيم الفيض Φ نجد أن:

$$\Phi = 80 \text{ mW/m2}$$

ومع ضرب هذه النتيجة بقيمة سطح الأرض نجد أن الفيض الكلى الخارج:

$$F = 40.\ 10^{12} \text{ watts} = 40 \text{ terawatts}$$

ونلاحظ أن نموذجنا يعطى F= 26 تيراوات فى الوقت الراهن (الشكل ٧). ولتحسين التآلف بين القياسات وتنبؤات النموذج، يمكن مثلاً أن نزيد - فى النموذج- من محتوى العناصر المشعة فى الكساء (بصورة لها دلالتها: نضاعفه). هل هذا ممكن؟ بالنسبة لبعض علماء كيمياء الأرض، نعم، وبالنسبة لآخرين، لا. ولكن هناك طرائق أخرى تجعل الكساء لا يترك الحرارة الداخلية تُفقد بسرعة كبيرة (وما

يحدث أن النموذج لا يحافظ على التغير التدريجى الحرارى الجوفى عند قيمة عالية بما يكفى إلى زمن كافٍ): تحسين قانون تغير اللزوجة بالنسبة لدرجة الحرارة والضغط، اعتبار أن للكساء طبقتين تسمحان بالحمل كل منهما على حدة، أن نأخذ فى الاعتبار تأثير الغطاء العازل الذى تمثله القارات. وليس أى من هذه الأشياء أمر سهل.

المجال المغناطيسى للأرض

ليس أمامى سوى القليل من الوقت لأكرسه للمجال المغناطيسى. ومن المتفق عليه اعتباره ناتجًا عن مولّد ذاتى الحث يعمل فى النواة الخارجية المعدنية الموصلة، السائلة، للكوكب. ويمكن تقدير الموصلية الكهربائية للنواة بمقدار 10^6 Sm^{-1}، وقد لا تكون لزوجتها مرتفعة كثيرًا عن نظيرها بالنسبة للماء. وقاعدة المولد ذات الحث هى ما يلى: تحث حركات الحمل - كما رأينا - السائل الموصل فى النواة، فى وجود مجال مغناطيسى، مما يُنتج تيارات كهربائية (هناك قطع للفيض) تحافظ على المجال المغناطيسى كما لو أنها ولّدته بالحث. وللمجال المغناطيسى الأرضى، مثل الذى نلاحظه فى الوقت الراهن فى محيط الأرض، بالتقريب الأولى والضخم، هندسة مجال قد يتولد عن ثنائى استقطاب - أو مغنطيس قصير - موضوع فى مركز الكوكب مرتب تبعًا لمحور دورانه. وهناك سبب بسيط وقوى لوضع منابع المجال الأرضى فى النواة السائلة للأرض، فهى تتغير مع الزمن - وهذا هو التغير القديم - على درجة من السرعة بحيث يمكن تغييرها بصورة لها دلالتها، فى الحجم وفى الاتجاه، خلال حياة بشرية. ولا يمكن لظاهرة قد تتخذ مصدرها فى الكساء الصلب - فى حدود ما رأينا، حيث لزوجة الكساء أعلى $١٠^{٢٣}$ من نظيرها بالنسبة للنواة - أن تقدم مثل هذه التغيرات.

وإذا أخذنا فى المتوسط بضعة ملايين من السنوات -لم تُؤخذ القياسات المباشرة إلا فى الثلاث مائة سنة الأخيرة، وبالنسبة للأزمنة الأكثر قدمًا يتم قياس

المجال الأحفوري في صخور القشرة الأرضية - فإن المجال المغناطيسي الأرضي هو على وجه الحصر مجال ثنائي الاستقطاب محوري مركزي. وخلال الأزمنة الجيولوجية انعكس ثنائي الاستقطاب مرات كثيرة، فقد حدثت توقفات خلال فترات زمنية من الاستقطابية المستقرة، كان ثنائي الاستقطاب خلالها متجه شمال - جنوب أو جنوب - شمال، عبر أزمنة طويلة تصل إلى بضع مئات الآلاف من السنوات، بواسطة الانعكاسات، أو الانقلابات، التي حدثت في بضع آلاف من السنوات فقط. وتلك التعاقبات للاستقطابات المباشرة أو العكسية هي التي، وقد سُجلت في أرضية المحيطات، أتاحت قياس زحزحات صفائح القشرة الأرضية خلال المائتي مليون سنة الأخيرة.

لن أصف المجال المغناطيسي أكثر من ذلك لكني أكتفي، حتى أظل في إطار عرضي، بقول بضع كلمات عن منابع الطاقة التي يمكنها المحافظة عليه في مواجهة التبديد الأومي.[٤] ومن السهل إلى حد ما تقدير القوة اللازمة لهذا الحفظ. وفي غياب مجال حث - إذا تصورنا أنه النواة السائلة - قد يتلاشى المجال المغناطيسي في وقت τ بضع عشرات الآلاف من السنوات (التيارات الكهربائية التي تسري في وسط موصل منتهي تبدد الحرارة). ويمكننا أيضًا، إلى حد ما، تقدير الطاقة W للمجال، في الوقت الراهن (لكن ليس هناك ما يدل على أنها قد تغيرت كثيرًا)، وهي بالإجمال، بعامل تقريبي، كل مربع المجال الممتد إلى كل الفضاء. وبقسمة الطاقة W على الزمن τ ، الذي يطلق عليه زمن كولينج Cowling، نحصل على قيمة القوة اللازمة لحفظ المجال. ونجد أن:

$$P = W/\tau - 10^{11} \text{ watts}$$

وبمقارنة تلك القيمة بقيمة فيض الحرارة الخارجة من النواة، التي نحصل على قيمتها الحالية - الأكثر ضآلة - بنموذجنا وهي $7: 10^{12}$ watts، نجدنا

---

(٤) الأومي ohmique: متعلق بالأوم وهي وحدة مقاومة كهربائية تعادل المقاومة الحاصلة في موصل عندما يحدث فرق من الجهد بين طرفيه، قيمته فولت واحد، تيارًا شدته أمبير واحد. (المترجم)

مدفوعين للاعتقاد بأن هناك ما يكفى من الطاقة الحرارية المتاحة لحفظ المجال المغناطيسى، حتى لو أن الآلية الحرارية ذات عائد ضئيل.

ولكن يوجد فى النواة مصدر آخر للطاقة الجاذبة، التى تنتج مجالاً ثانيًا لقوى أرشميدس، وتضاف هذه القوى إلى القوى الناتجة عن تغاير درجة الحرارة، محرك الحمل الحرارى. وفى الواقع فإن العنصر الخفيف المتكون من الخليط الذى يصنع النواة الخارجية لا يدخل فى البذرة الداخلة التى تنمو بتصلب الحديد (وهناك ملاحظة مألوفة أن الثلج يتكون انطلاقًا من ماء ملوث يبدو نظيفًا). وهذا العنصر الحر، الأكثر خفة من الخليط المحيط، يغذى قوى قابلية الطفو التى تحدثت عنها. ومن الواضح أن المعدل الحالى لنمو البذرة، وتصلبها يمكن أن تتيح قوة مقدارها ١٠^١٢ وات. وبشكل خاص، من الواضح أن عائد هذه الطاقة الجاذبة ممتاز. وسبب ذلك أنه لا يفلت من النواة التى تحوله إلى حرارة، والطريقة الفضلى لإنتاجه هى حفظ التيارات الكهربائية، فى النواة، والتبديد الأومى أكثر تأثيرًا بكثير من تبديد اللزوجة. لكن البذرة، كما رأينا، لا يتجاوز عمرها مليارى سنة. فماذا كان عليه الأمر قبل ذلك؟ يجب بلا شك التسليم بأن آلية حفظ المجال المغناطيسى الأرضى تغيرت خلال الأزمنة الجيولوجية.

الخلاصة

على سبيل الاستنتاج سوف أترك نفسى للتوصل إلى بعض التأملات حول مستقبل الأرض:

نفرض الشمس أيضًا ٥ مليارات سنة فى عمرها. عندئذ سوف ينتهى التوازن بين الجاذبية وقوى الضغط التى تغذيها التفاعلات النووية الحرارية، وسوف ينهار النجم، وفى هذه الحالة لن ننظر إلى ما هو أبعد من ذلك. تبرد الأرض. فهل ستكون كوكبًا ميتًا قبل اغتيال الشمس؟ هل ستشغل البذرة كل حجم النواة؟ هل يتوقف الكساء عن نقل الحرارة بالحمل؟ إذا كانت الإجابة بنعم، ماذا ستكون العواقب على الأحوال السائدة على سطح كوكب الأرض؟ قلت إنها كانت إلى حد بعيد مستقلة عن الحرارة الداخلية، وبالتأكيد ليس ذلك حقيقى تمامًا. وقلما تسهل الإجابة عن هذه الأسئلة، ولا يكفى أن نعمم بجرأة منحنيات التطور التى قدمتها إليكم. وربما، على سطح الأرض، لن تكون الأشياء أكثر اختلافًا، فى أربعة مليارات سنة، عن تلك الموجودة فى الوقت الراهن.

بنائية الصفائح:
من المحيط إلى الفضاء[*]

بقلم: زافييه لو بيشو
Xavier LE PICHON

ترجمة: عزت عامر

عندما بدأت مهنتي في مجال البحث في ١٩٥٩ لم نكن نعرف حتى بوجـود ظهير الوسط المحيطي mediooceanique، البنية الأكثر ضخامة لكوكبنا، حيث إن طولها يصل إلى ٥٠٠٠٠ كيلومترًا. وكان المحيط يعتبر أيضًا ذو عمر يصل على الأقل إلى عمر القارات. وفي هذه الحالة اكتشفنا أنه كان أكثر شبابًا بثلاثين مـرة، لذلك كانت معرفتنا بالجزء من الأرض المغطى بالماء بدائيـة. وكـان استكـشاف المحيطات هو الذي قاد إلى تهيئة معرفتنـا فـي الـستينيات ببنائيـة tectonique الصفائح بأن قدّم للمرة الأولى نموذجًا كميًا متماسكًا لتطور كوكبنا.

والمفارقة أن هذا النموذج، وهو أيضًا مبسط جدًا، اعتمـد علـى معطيـات محيطية تمامًا. وفي الوقت الراهن، بفضل تقنيات جيوديزية[٦] فضائية تقدمت بنائية الصفائح بسرعة كبيرة انطلاقًا من معطيات تتعلق هذه المرة على الوجه الحـصر بالقارات. ولم تعد ببساطة تحركات الصفائح الضخمة هـي التـي يـتم تعيينهـا. ونحصل من الآن فصاعدًا على وصف تفصيلي للتشوه المتواصل الـذي يـصيب تخوم الصفيحة والذي يؤدي إلى النشاط الزلزالي. وهكذا نصل إلـى فهـم أفـضل بكثير لما يُطلق عليه الدورة الزلزالية، تلك الدورة التي تتسبب فـي العـودة شـبه الدورية للزلازل بالغة الشدة.

(*) نص المحاضرة رقم ١٩٧ التي ألقيت في إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٥ يوليو ٢٠٠٠.

(٦) جيوديزي geodesique: خاص بعلم المساحة التطبيقية. (المترجم)

ويوضح الشكل ١ توزيع تضاريس أعماق المحيط العالمى، ذلك التوزيع الذى تبثه لنا الأقمار الصناعية تبعًا لانحراف سطح المحيطات بواسطة القوة الجاذبة، وتكشف لنا هذه الدورة غير العادية للقدرة التقنية منظرًا مختلفًا، إلى حد ما، لما يخص القارات عن المنظر من القمر. ويسود فى عمق المحيط وجود ارتفاع متوسط عامة، سوى فى المحيط الهادى، متقطع بواسطة تصدعات ضخمة عمودية. ونعرف فى الوقت الحالى أن الأمر يعود إلى محور هذه التضاريس، الذى يطلق عليه ظهير الوسط المحيطى، الذى تتشكل منه الأعماق المحيطية الجديدة بقدر ما تتباعد الصفائح المتجاورة، بسرعة بضعة سنتيمترات سنويًا. وتمتد هذه التضاريس الهائلة على طول ٥٠٠٠٠ كيلومترًا تقريبًا، ولو أن مياه المحيط كانت قد جفت لكان الراصد القمرى قد ميّز الأرض على أنها كوكب الظهير. ومع ذلك فإنه منذ أربعين عامًا، عندما بدأت بحثى، كنا قد بدأنا بالكاد الشك فى وجود هذه البنية التى تلعب دورًا مهمًا فى عمل الأرض. لذلك لم نعرف أى شىء عن هذا العمل.



الشكل (١)

قياس الأعماق البحرية للمحيط منظور إليها من قمر صناعى.
ويتعلق الأمر فى الواقع بطبوغرافيا مصغرة لسطح المحيط
التى تعكس الطبوغرافيا الحقيقية للعمق تحت تأثير قوة الشد الجانبى.
الجانب الأساسى لهذه الطبوغرافيا لم يكن معروفًا منذ أربعين سنة.
وثيقة من GRGS فى تولوز

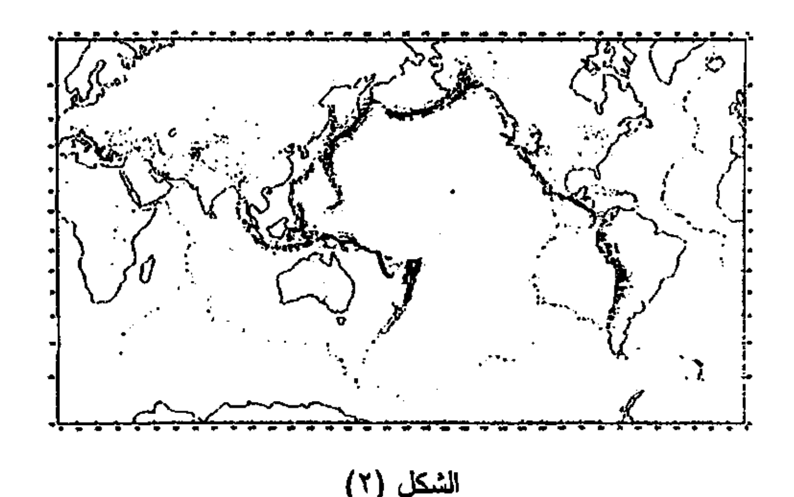
وفى الواقع ظننا أن الأحواض المحيطية كانت أيضًا قديمة مثل القارات وأن عمرها يبلغ مليارات السنين. ونعرف الآن أنها تقريبًا أكثر شبابًا خمسون مرة فى المتوسط. واعتقدنا أنها هادئة من الناحية البنائية. واكتشفنا أنها فى مصدر النشاط الزلزالى والبركانى. واعتبرناها مثل مكان تجمع لبقايا تآكل القارات منذ ظهورها. لكن الطبقات الهائلة للرواسب التى تشكلت من هذه البقايا غير موجودة. والنموذج السائد كان يفترض أن سطح الأرض لا يتأثر إلا بالتحركات العمودية وكان يعتبر انحراف القارات كما لو أنه أسطورة تم القضاء عليها. وفى هذه الحالة فإنه ليست القارات بل مجمل الأعماق المحيطية أيضًا قد شهدت بلا توقف إعادة تشكيل بواسطة بنائية الصفائح. نحن نضل الطريق تمامًا: كان فهمنا لأسلوب عمل الأرض خاطئًا.

وبالطبع كان استكشاف الأعماق المحيطية، الذى شهد بذخًا بواسطة مختبرات مولتها البحرية الأمريكية منذ نهاية الحرب العالمية الثانية، هو الذى فرض النموذج الجديد للأرض الذى أُطلق عليه منذ ذلك الحين بنائية الصفائح. وقد أظهر هذا الاستكشاف فى الستينيات ليس فقط أن الأعماق المحيطية شابة من الناحية الجيولوجية، إذ إن متوسط عمرها نحو ٦٠ مليون سنة وأن القطع الأكثر قدمًا تعود إلى وسط الحقبة الثانية، ولكن أيضًا هذا العمر يزداد بالتدريج عندما نبتعد عن ذروة الظهائر dorsales. وأصبح واضحًا أن الطريقة الوحيدة لإنتاج مثل هذا التوزيع للأعمار هى عملية من نوع "البسط النقالة" التى تصل إلى السطح تحت ذروة الظهائر وتبتعد عنها فيما بعد بشكل متماثل. وبما أن الأعماق المحيطية تغطى ٦٠ فى المائة من سطح الأرض، كان مستبعدًا أنه تم تخليقها عقب تمددها. ولابد أنه كان من الضرورى عندئذ وجود تزايد للسطح بنسبة ٢٥٠ فى المائة و٤٠٠ فى المائة للحجم خلال فترة زمنية أقل من ٥ فى المائة من تاريخها. وكان من الضرورى فى هذه الحالة أن تتوارى كمية مساوية من سطح الأعماق المحيطية فى الأطراف الأخرى للمحيطات بأن تغطس فى الحفر العميقة وهو ما يعرف بانزلاق الصفائح[٧] الذى يحيط بنطاق المحيط الهادى وشمال المحيط الهندى.

---

(٧) انزلاق صفيحة subduction: انزلاق صفيحة من القشرة الأرضية المحيطية تحت صفيحة مجاورة متقدمة عليها فى اتجاه معاكس. (المترجم)

وهكذا يتضح النشاط الزلزالى الأرضى، الذى يقدمه الشكل ٢، الذى ينحصر على طول ذروة الظهائر والحفر الضخمة. وتضع هذه الأحزمة الزلزاليـة معـالم حدود بعض الصفائح الضخمة التى لا يتغير شكلها والتى تنشأ عن حركات تباعـد عند ذروة الظهائر، أو الاقتراب من الحفر أو انزلاقات بطول بعض قطع الحـدود. والنشاط الزلزالي والبركانى هو تعبير فجائى وتشنجى لحركة مـستمرة للـصفائح التى تصنع التضاريس المحيطية وكذلك الخاصة بالقـارات. وأصـبحت دراسـة الزلازل جزءًا مكملاً لدراسة عناصر تكوّن التضاريس. ويضم علم الزلازل البنائية التى لم تتوقف بعد عند الشاطئ.

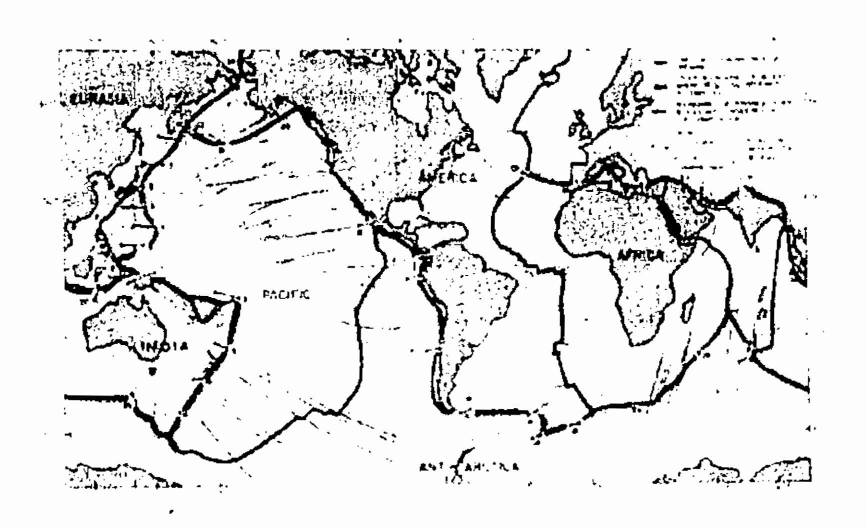


الشكل (٢)

الزلزالية على سطح الكرة الأرضية. وظهرت للمرة الأولى فى مجملهـا فى الستينيات بفضل شبكة من كاشفات تجارب نووية. وتتـيح الزلزاليـة تعيين حدود الصفائح حيث ينتج النشاط الزلزالى عن الحركة النسبية.

والإبداع الرئيسى لهذا النموذج يأتى من أنه نموذج كمى. فنحن نعرف اتجاه الحركة بفضل الزلازل وتصدعات الانزلاق. ويمكن من جانب آخر قياس سـرعة تباعد الصفائح عن محور الظهائر، بفضل الانحرافات المغناطيسية الناتجـة عـن الصخور البركانية التى تحفظ استقطاب المجال المغناطيسى الأرضى المكتسب فى

لحظة تبريدها، وحيث إن المجال ينعكس دوريًا، تعيـد قطاعـات متعاقبـة مـن الصخور الممغنطة إيجابيًا وسلبيًا تسلسل الانعكاسات وتتيح تأريخ عمق المحيطات. وسرعة التباعد هي انحراف خريطة الأعمار، انحراف يُقاس في بضعة ملايين من السنين. عندئذ يتم الحصول على موجة الحركة النسبية للصفائح على طول كل حد محيطي انطلاقًا من قياس مستقل للسرعة ولاتجاه الحركة. ويمثل ذلك قاعـدة أول نموذج حركي للكرة الأرضية يستخدم هذه القياسات وحقيقة أن الأرض كرة نصف قطرها ثابت لحساب الحركة في كل نقاط حدود ست صفائح رئيسية (الشكل ٣).



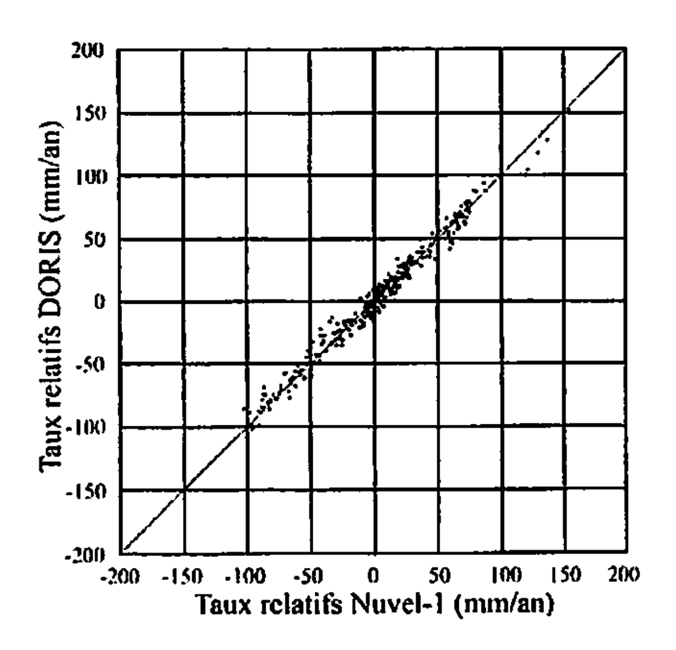
الشكل (٣)

شكل أصلي من المقالة التي نشرتها في ١٩٦٨
يقدم أول نموذج كمي شامل لتزحزح الصفائح على سطح الأرض.
وبمعرفة الحركات على الحدود على امتداد محور الظهائر، حسبت
الحركات على الحدود التي يحدث لها تقصير في حفر انزلاق الصفيحة
في نطاق المحيطات بالتسليم بأن الأرض لم يتغير حجمها عبر الزمن.
واستخدمت ست صفائح لأجعل المشكلة متوافقة مع المعطيات التي كانت
تحت تصرفي. وبعد عشرين سنة أثبت القياس المباشر للتحركات بواسطة
القمر الصناعي صحة نموذجي.

وتم الحصول على النموذج الحركى للكرة الأرضية انطلاقًا من قياسات ناجمة عن المحيطات فقط، وبشكل رئيسى عن ذرى الظهائر. ولم يتم استخدام أية معلومات تم الحصول عليها من القارات؛ لذلك فهذا النموذج كان محيطيًا خالصًا سمح مع ذلك بتحديد الكمية الكلية لتقصير طول الحدود القارية، مثل ذلك الذى لاحق الألب والهيمالايا. لكن هل كان لفكرة الحد بعد ذلك معنى فى تلك المناطق حيث توزع التشوه أحيانًا فى عدة آلاف من الكيلومترات؟ وهل يمكن من جانب آخر أن تكون لدينا ثقة فى فرضية ثبات الحركة خلال بضعة ملايين السنوات التى كانت سرعة تباعد الصفائح خلالها متوسطة؟

ولقد حدث ابتداء من الثمانينيات أن أتاحت الجيوديزية الفضائية الإجابة عن هذين السؤالين. وبفضل هذه التقنية الجديدة الرائجة فى الوقت الحالى بالاستخدام المتنامى لتقنية GPS (نظام الملاحة العالمى)، يمكن من الآن فصاعدًا قياس موقع نقطة فى الجزء البارز من الأرض بدقة متزايدة تتراوح فى الوقت الراهن بين ٢ إلى ٣ ملليمترات. وبتكرار هذا القياس، نحصل مباشرة على سرعة الصفيحة الموجود فيها تلك النقطة التى تم قياسها. ويتعلق الأمر بالتأكيد بسرعة لحظية يمكنها أن تتضمن عددًا معينًا من الحالات المؤقتة ترتبط بشكل خاص بتراكم تشوهات مرنة تنطلق خلال الزلازل التالية. إلا أنه نظرًا لأننا نضعها بعيدًا عن حدود الصفائح فإن هذه الحالات المؤقتة تكون قليلة الأهمية ويكون لدينا تقديرًا جيدًا للسرعة المتوسطة للصفيحة. ويُبرهن على هذه النقطة التوافق اللافت للنظر بين سرعات الصفيحة التى يتم الحصول عليها انطلاقًا من قياسات محيطية متوسطة خلال بضع ملايين السنين والقياسات الجيوديزية التى يتم إجراؤها فى بضع سنوات متباعدة (الشكل ٤). ونلاحظ أن هذا الإثبات يبين بطريقة قاطعة، بعكس ما أكده آخر أنصار نموذج تمدد الأرض بدون انزلاق الصفائح، أن هناك توازنًا كبيرًا على سطح الأرض بين تخلق سطح جديد عند محور الظهائر وهدم سطح بواسطة انزلاق الصفائح فى الحفر والتصادم بطول سلاسل الجبال النشيطة.

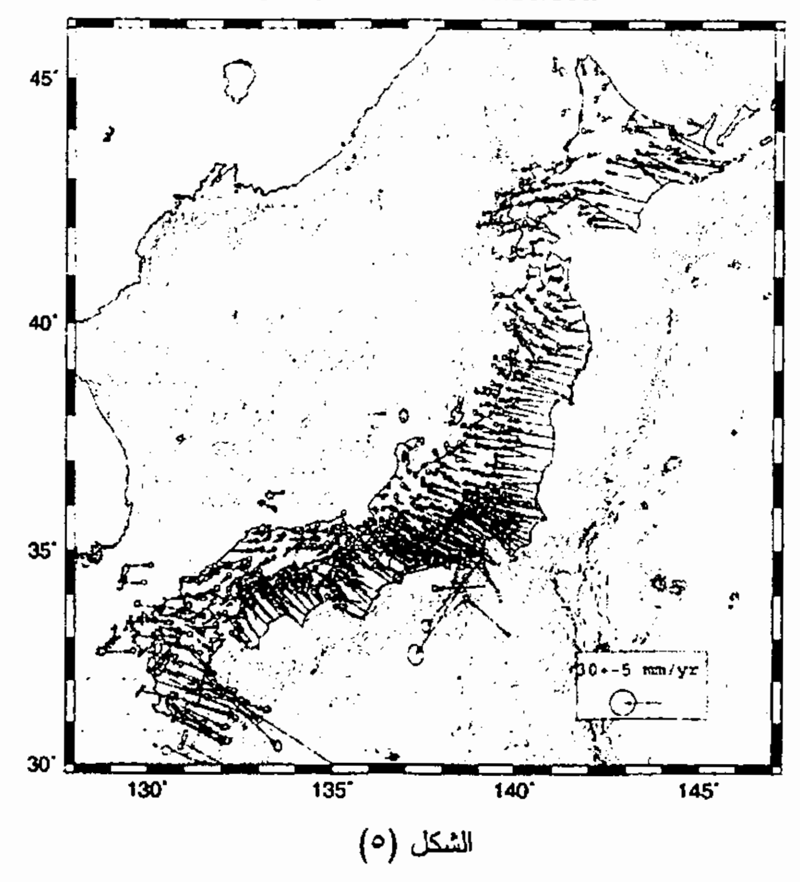
وأعترف بأننى شعرت بإثارة عميقة عندما أثبت أول قياس جيوديزى للاقتراب بين هاواى واليابان، ٩ سنتيمترات سنويًا نحو الشرق، بعد عشرين عامًا صحة السرعة التى كنت قد حسبتها بنموذجى الشامل. كذلك توصلت الجيوديزية، بعد عامين من القياس المباشر، إلى السرعة محسوبة بشكل غير مباشر انطلاقًا من دائرة شاملة ومع افتراض ثبات الحركة خلال عشر ملايين سنة. ومنذ الآن تتيح أداة جديدة قوية جدًا قياس تحركات كل أقسام صفيحة تظهر فى بضع سنوات. وتم الانتقال من نظام محيطى كلية أُنشئ فى عدة ملايين السنوات إلى نظام يغطى كل النطاق الذى ظهر ويقدم سرعة حقيقية فورية. ولم نعد نعتمد على قياسات سرعة التمدد على محور الظهائر. وأصبحت حركية الأحواض الهامشية سهلة المنال أيضًا أكثر من حركية مناطق التشوه القارية.



الشكل (٤)

تحركات الصفائح كما تما قياسها بواسطة الأقمار الصناعية الجيوديزية
(النظام الفرنسى Doris) خلال بضع سنوات مع مقارنته بما تم قياسه
بواسطة معدل التمدد فى عمق المحيطات خلال ٣,٥ مليون سنة.
وكان هناك توافقًا تامًا فيما يتعلق بالجانب الأيمن. وقد تعود الانحرافات
الضئيلة على الأقل جزئيًا إلى الدقة غير الكافية أيضًا للقياسات.
وثيقة من GRGS من تولوز

وفى الواقع، يمكن لنا أن نقيس الآن بطريقة مستمرة الموقع، ومن ثم الحركة والتشوه، بكثافة الأرصاد الفضائية والزمنية التى نرغب فيها. ومن الواضح أننا دخلنا فى عصر جديد لدراسة تشوه السطح الأرضى، وأنه قد صار لدينا بالتالى أخيرًا احتمال عمل نماذج تفصيلية من هذه المعطيات. وأصبح من الممكن التصدى بطريقة جديدة تمامًا لمشكلة التشوه المرن الذى يفضى إلى الانقطاعات الزلزالية. ويبين الشكل ٥ كذلك مثالاً لشبكة أرصاد جيوديزية مستمرة تغطى اليابان. ويوجد حاليًا موقع للقياس المستمر بنظام الملاحة العالمى GPS كل ٣٠ كيلومترًا.



الشكل (٥)

مُوَجِّهات vecteurs زحزحة تم قياسها بمحطات شبكة GPS
المستمرة للخدمات الجغرافية اليابانية.

وتنكمش اليابان باستمرار بقيمة ٣ سنتيمترات سنويًا فى الاتجاه الشرق – الغرب خلال الفترات ما بين الزلازل. وبعد مائة سنة، يكون التشوه المرن بقيمة ثلاثة أمتار تقريبًا قد توقف فجأة وترتد اليابان نحو موقعها غير المشوه.

وتتيح لنا هذه القياسات للمرة الأولى أن نصل إلى فهم لآليات التشوه على حدود الصفيحة والتى تؤدى إلى الزلازل الشديدة.

وتتيح هذه الشبكة التتبع فى الزمن الواقعى لتشوه اليابان تحت تأثير غوص صفائح محيطية تحت حافتها الشرقية. وبين زلزالين تقترن صفيحة فى حالة انزلاق وقوس جزيرى يابانى بصورة آلية بواسطة الاحتكاك على طول مستوى تماسهما. ويتم دفع اليابان إلى الغرب وتتكمش بمعدل ٣ سنتيمترات سنويًا. وفى نهاية مائة عام تتراجع بشدة الأمتار الثلاثة من التقلص المرن المتراكمة خلال انقطاع زلزال ضخم بطول الحفرة التى تسمح لصفيحتين بالارتداد إلى موقعي توازنهما. وسوف تحمل المراقبة التفصيلية لدورة زلزالية كاملة معارف لا ريبة فيها حاليًا حول آليات معقدة جدًا تتحكم فى هذه الظواهر. ومنذ الآن أدركنا الكثير عن توزيع التقارن الميكانيكى فى سطح التماس بين صفيحتين.

والخلاصة أننى أرغب فى تكرار القول بأننا لن ندرك شيئًا عن الحياة الجغرافية لكوكبنا ما دمنا نرفض النظر من فوق الشاطئ نحو أعماق المحيطات. وكثيرهم المعاصرون اللذين ظنوا أن استكشاف أعماق المحيطات كان تبديدًا باهظ التكاليف؛ حيث إنه لم يفض إلى شىء ذى أهمية فى هذه الأعماق السحيقة. ألم يكن أكثر أهمية درس القارات التي كنا على هذه الدرجة من القرب منها وهى الجوهرية بدرجة كبيرة. ونسمع فى الوقت الحالى نوع الخطاب نفسه. ولقد قاد استكشاف عمق المحيطات إلى نموذج جديد لعمل الأرض. ولكن الآن وقد أصبح لدينا هذا النموذج فإن مواصلة هذا الاستكشاف مرتفع التكلفة يعتبر إضاعة للوقت والمال. وعلينا أن نركز على القارات. يا للأسف، الأخطاء نفسها ينتج عنها النتائج نفسها. الأرض منظومة معقدة لا يمكن دراستها إلا كوحدة. ويلعب المحيط والقارات أدوارًا متكاملة، ويؤدى تجاهل إحداها إلى عدم تفهمها فى مجملها.

والدرس الثانى، كما يبدو لى، يتعلق بضرورة مدخل متعدد النظم لفهم الظواهر شديدة التعقيد التى تحكم الآليات الأرضية. غير أن الباحثين الذين نمثلهم هم اختصاصيون أكثر فأكثر تدقيقًا يميلون إلى تجاهل النتائج الآتية من النظم الأخرى. وبنائية الصفائح بالنسبة لعلم الزلازل والبنائية يمثلان نظامين تحتيين لدراسة تشوه الأرض. ولقد وسعت الجيوديزية الفضائية هذا المجال بالنسبة

للجيوديزية ولميكانيكا الصخور. غير أنه حتى الوقت الراهن تأهل علماء الجيوديزية وعلماء الميكانيكا دون أدنى معرفة بالمجال الجيوديزى والميكانيكى. وحالة المعارف الجيوديزية والميكانيكية لعلماء الزلازل والبنائية نادرًا ما كانت أكثر تألقًا. وتأهيل فرق اختصاصيين متعددة النظم لديهم الثقافة العامة الضرورية لتناول هذه المشاكل المعقدة يعتبر اليوم مشكلة أساسية علينا حلها إذا كنا نريد الانتفاع كليًا من هذه الطفرة الحقيقية للبنائية.

الزلازل والمخاطر الزلزالية[٨]

بقلم: ميشيل كامبيلو

Michel CAMPILLO

ترجمة: عزت عامر

كانت هناك على الدوام كوارث مترادفة، وتركت الزلازل آثارها على التاريخ البشرى كمعجل للتحولات الاجتماعية والاقتصادية. وبالنسبة للظواهر الطبيعية العنيفة والمدمرة أحيانًا، والمنبعثة من الأعماق وبناء عليه تكون مصحوبة بقوى غامضة، لم تصبح الزلازل موضوعًا للدراسات العلمية إلا منذ قرن. ولم يبدأ المدخل المبنى على العقل إلى هذه الظواهر، إلا بأجهزة القياس والتسجيل لتحركات الأرض، وأجهزة قياس الزلازل. حتى عندما أصبح من المستطاع تسجيل هذه الهزات الأرضية، لم تكن الأرض أقل إبهامًا وكان على الزلازل أن تجتاز طريقًا طويلاً قبل أن نستطيع تقديم صورًا لهذه العملية الفاعلة أثناء الزلازل، وهذه هى المسيرة التى سوف نتبعها أولاً. بعض الزلازل الشديدة تُرى مباشرة على السطح وقد جمع علماء الجيولوجيا مبكرًا بين الفوالق الكبرى وبين الزلازل (الشكل ١).

وأشارت أرصاد مباشرة نادرة بشكل واضح إلى أن الزلزال يطابق انزلاقًا سريعًا فى الفالق الذى يسمح بانطلاق الضغوط المتراكمة فى الصخور خلال الأزمنة الجيولوجية. واستطاعت هذه التحركات المتكررة فى بعض المناطق أن ترسم المسار الذى أصبح كتابًا عن تاريخ الزلازل. وأتاحت صور الأقمار الصناعية، التى شاع استخدامها فى الأرصاد الجوية، لعلماء الجيولوجية فرصًا جديدة للرؤية على مستويات مختلفة وأدت إلى اكتشافات فعلية حول هندسة وعمل الفوالق الكبرى.

---

(٨) نص المحاضرة رقم ١٩٨ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٦ يوليو ٢٠٠٠.



الشكل (١)

مثال لأثر زلزال على السطح:

طريق ذو ممرين وقد أزيح إلى الجانب بنحو ستة مترات خلال زلزال

لانديرس Landers فى كاليفورنيا الجنوبية فى ١٩٩٢.

وتدل استقامة الطريق على أن الانزلاق حدث فى منطقة ضيقة جدًا.

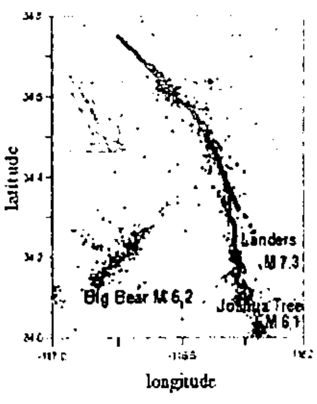
(صورة م. كامبيلو M. Campillo)

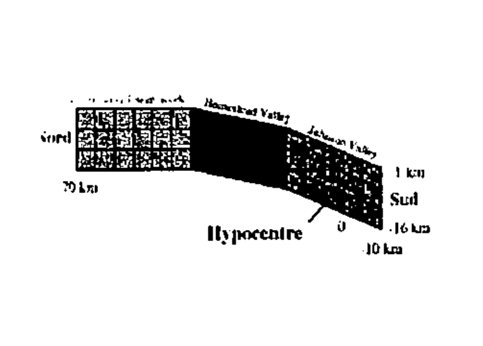
وبواسطة تطور بنائية الصفائح سوف يُتاح رسمًا تخطيطيًا للتمثيل المتماسك لفهم كيف أن التحركات الشديدة التى تؤثر على القارات بمجملها مسؤولة عن الزلازل. وحتى واجهت فرضيات محددة مثل وجود صفائح صلبة ومتصلة الاعتراض من جديد، فإن النظرية الشاملة لبنائية الصفائح تظل هى أساس التفسيرات الحديثة للزلازل. وهذه التحركات بطيئة جدًا بالنسبة لظواهر مألوفة: بضع سنتيمترات سنويًا من التقارب بين نقطتين تتباعدان عدة عشرات من الكيلومترات تناظر تشوهًا جيولوجيًا سريعًا جدًا. ومع ذلك فإن التحركات النسبية للصفائح معروفة ويتم قياسها بواسطة التطورات الجيوديزية، وتتيح الجيوديزية

الفضائية اليوم تتبعًا دائمًا لتشوه سطح الأرض بدقة وكثافة قياس دائمة التحسن تؤدى إلى الاعتقاد بأننا فى عشية رؤية جديدة للبنائية.

غير أنه بالنسبة للزلازل الحادثة فى العمق، وفى غياب رصد مباشر، من الصعب تطوير نماذج فيزيائية تضع الظاهرة فى حسابها بشكل كمي. ولحسن الحظ فإن علم الزلازل هو أيضًا علم الموجات الميكانيكية فى الأرض. ويعود إلى المعلومات التى تحملها الموجات من الأعماق نحو أجهزتنا على السطح أنه أصبح متاحًا لنا إعادة جمع ما حدث خلال برهة قصيرة من الزمن عندما تحركت الفوالق بسرعة وأنتجت الزلازل؛ لذلك فبطريقة الأطباء الذين يستقصون حالة الأجسام بأجهزة التصوير يستطيع علماء الزلازل الكوكب لاكتشاف مراحل تكوّن الزلازل. وكان من الواجب لهذا الغرض تحديد تركيب الأرض وخواص الطبقات المختلفة. والبنى الضخمة التى يتكون منها كوكبنا فى الوقت الراهن معروفة لكن على حدودها يظل هناك عدم تحدد كبير. وهذه هى مثلاً الحالة فى العمق السحيق (نحو ٢٨٠٠ كيلومترًا تحت أقدامنا) فى الحدود بين النواة والكساء. والقشرة الأرضية الأكثر قربًا واللازمة مباشرة فى دراسات الزلازل، هى الطبقة التى يكون فيها التنافر مشهودًا فى الوقت نفسه بأرصاد السطح وبالدراسات الزلزالية. وفى الجزء العلوى من هذه الطبقة بسمك يتراوح بين ٣٠ و٤٠ كيلومترًا تقريبًا تحت القارات تحدث الزلازل. وفى مناطق انزلاق الصفيحة تكون هذه الطبقة الهشة مسحوبة نحو الأسفل بواسطة الصفيحة الغاطسة ويمكن أن تحدث الزلازل فى العمق. والوصف التفصيلى للبنية الداخلية للقشرة والموجات الزلزالية التى تنتشر فيها يعتبر موجزًا. والمغامرة مازالت مستمرة أيضًا: ليس هناك من لا يعرف أيضًا التكرار التام لرسم التسجيل الزلزالى بالقرب من زلزال بقدر ما نعرف أن الطبيعة معقدة ومستغلقة دائمًا. إلا أن مجئ الحساب الرقمي وتطورات التجهيزات أتاح لنا تطورات مهمة ومن الممكن فى الوقت الراهن إعادة إنشاء سيناريو زلزال شديد. ويعتمد علماء الزلازل فى ذلك فى الوقت نفسه على الأرصاد الجيوديزية (كيفية حدوث تشوه لسطح الأرض بواسطة الزلزال) وقوانين علم الزلازل (ماذا كانت عليه تحركات

التربة عند حدوث الزلزال، ومدى التأثيرات التى حدثت للمناطق المجاورة مباشرة التى تكون على مسافات بعيدة فى حالات الزلازل الشديدة). وتتيح طرائق رياضية يطلق عليها "طرائق عكسية methodes inverses" إعادة إنشاء تاريخ زلزال انطلاقًا من معطياته ومن نماذج رقمية لرد فعل القشرة الأرضية. وتتضمن أفلام عرض الزلزال هذه رصدًا جديدًا لعمل الأرض مما يفتح أبوابًا جديدة لفهم الزلازل وعمل نماذج لها. وتوضح لنا هذه الصور كيفية انتشار الفتق فى العمق بسرعة نحو ٣ كيلومترات فى الثانية، وكيف تكون مستويات الانزلاق فى العمق مختلفة (ولسوء الحظ فإنها ليست أكثر بساطة من تلك التى نرصدها على السطح). ويمكن لجبهة الفتق أن "تثب" من فالق إلى آخر أو أن تُنتج تذبذبات أو حتى ارتدادات إلى الخلف. والمثال المثير قدّمه زلزال لاندبرس Landers الذى حدث فى كاليفورنيا فى ١٩٩٢. وقع هذا الزلزال فى منطقة مجهزة بشكل جيد فى المستوى الزلزالى. ويضاف إلى ذلك أن الأحوال الجوية توضح أن صحراء موهاف Mohve جاهزة تمامًا لقياسات الرصد عن بعد بواسطة الأقمار الصناعية. وأتاح ذلك لفريق من وكالات الفضاء الأوروبية CNES (ماسونيه Massonet وآخرون فى ١٩٩٤) إثبات فعالية طريقة رادار مقياس التداخل الذى كان الفريق قد استكمله. وأدى الربط بين الأرصاد الزلزالية والجيوديزية إلى إعادة إنشاء تاريخ الزلزال: كيف تزحزت حواف الفالق فى منطقة تمتد ٧٠ كيلومترًا تقريبًا، وعمقها نحو ١٥ كيلومتر وحدث ذلك خلال أقل من ٢٠ ثانية. والعرض الملائم هنا يوضحه الشكل التالى (الشكل ٢).

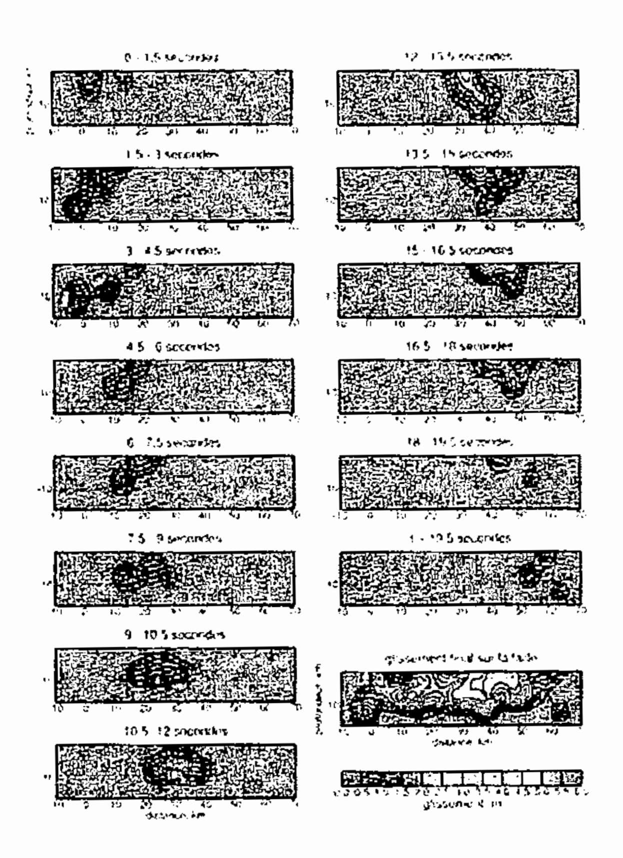




الشكل (٢)

المناطق المنزلقة تم رصدها على السطح خلال الزلزال
موضحة فى الشكل بواسطة الشرائح الملونة.
الفتق حادث أيضًا فى العمق يتم عرضه فى سطح عمودى
كما هو موضح فى الجزء الأيمن من الشكل.

ويوضح الشكل التالى انتشار المنطقة المنزلقة فى الفوالق النشيطة خلال الزلزال (تبعًا لهيرنانديز Hernandez وكوتون Cotton وكامبيلو Campillo ١٩٩٩) (الشكل ٣). وانطلاقًا من هذه الصور أصبح من الممكن ضبط نماذج ميكانيكية كمية للهزات الأرضية. وتؤدى كل الأرصاد إلى القول بأن الزلازل تنتج بشكل أساسى فى الفوالق الموجودة من قبل؛ لذلك فإن المفهوم الذى يفرض نفسه لفهم الزلازل هو الاحتكاك، سلوك الجمادات فى حالة التماس الذى تمكن رؤيته فيما يحدث فى العديد من المواقف من الحياة اليومية والذى لاحظ ليوناردو دى فينشى سابقًا أهميته لفهم العالم المحيط بنا. ويتيح سلوك الأجسام المتماسة مع الاحتكاك عمل نماذج بشكل جيد لكيفية استطاعة فالق أن يصبح زلزاليًا أو غير زلزالى asismique.



الشكل (٣)

المناطق النشيطة يتم تمثيلها فى لحظات مختلفة.

مقياس الألوان يعطى قيمة لسرعة الانزلاق الذى قد يكون أعلى

من ١ متر كل ثانية.

وتعطى المجموعة الأخيرة التوزيع النهائى للانزلاق.

ويمكن توضيح ذلك بتجربة صغيرة تشير إلى السلوكيات المختلفة للانـــزلاق مع الاحتكاك. ويكفى لهذا الغرض السحب البطىء بطريقة زنبرك كتلة موضـــوعة على مائدة. إذا كان الزنبرك شديد الصلابة، تتحرك الكتلة ببساطة بطريقة مستمرة بسرعة اليد نفسها. فإذا اخترنا زنبركًا أقل صلابة، فإن الشد الذى نحدثه يبدأ بتغيير

شكل الزنبرك بشكل ملحوظ، وتظل الكتلة ثابتة بسبب الاحتكاك. وعند لحظة معينة تنطلق الكتلة فى حركة سريعة، ويقل الاحتكاك بشكل ملحوظ وتُسترجع الإزاحة السابقة لليد فى الحال تقريبًا. ويتناول الحديث هنا الانزلاق بحركة متقطعة، وهى ظاهرة قريبة جدًا من سلوك الفوالق الزلزالية. والتماثل محدود تمامًا بالتأكيد ولكن وجود الأسلوبين، الانزلاق المستقر والمتقطع يعطى تصورًا جيدًا للفيزياء الأولية المستخدمة فى المنظومات الأكثر تعقيدًا إلى أقصى درجة ألا وهى الفوالق. وفى الواقع فإن الفوالق أشياء يصعب وصفها، مثل الكثير من الأشياء الطبيعية، بحكم التعقد الموزع على مستويات مختلفة. ومن الصورة الفضائية حتى الرصد الحركى، يُظهر الفالق فى الواقع إبدالات وغصينات وكلها فى حالة تعقد يحول دون تطبيق نماذج بسيطة قد يمكن حسمها بتجارب مختبرية على مستوى صغير (سنتيمترى على نحو نموذجى). والمشكلة التى تُطرح حينئذ تقييم كيفية تحليل نماذج ميكانيكية بسيطة لأرصاد طبيعية: وهى مشكلة ذات أهمية حيث إنها تنتسب مباشرة إلى مسألة التنبؤ بالهزات الأرضية. فلنضع فى اعتبارنا أولاً درس الأرصاد. فى حالات معينة، تبدو الزلزالية كما لو أنها تشير إلى شكل بسيط من الحتمية. وتلك كانت على وجه الخصوص الحالة التى صاحبتها هزات أرضية رجّت تركيا منذ الأربعينيات والتى تشير إلى تقدم نحو الشرق بطول فالق غرب الأطلنطى حتى الأحداث المأساوية فى ١٩٩٩. وسبق أن لاحظ ألين Allen فى ١٩٦٩ أن هذا التقدم يماثل فى خطوطه العريضة تطور الفتق الناتج عن استجابة مرنة بسيطة للفالق المرتبط بالأحداث السابقة. ولسوء الحظ أنه يبدو فى كثير من الأحوال الأخرى من المستحيل اكتشاف منطق بهذه البساطة فى تعاقب الزلازل. ما موقف العلم فى مواجهة إثبات هذه الحالة؟ وسيان لم نكن فى مرحلة تطور فى المعارف كافية للتنبؤ بالقواعد التى تجعل السلوك الطبيعى واضحًا بالنسبة لنا، أو أن هذا السلوك فى جوهره لا يمكن توقعه، أى أنه يعتمد كثيرًا على اضطرابات صغيرة لعدد كبير من البارمترات. تجد كلاً من الإجابتين أنصارًا لها من بين علماء الزلازل. ويبدو أن نماذج التجمع النووى nucleation، التى تصف تطور الفالق

قبل الزلزال، تشير إلى احتمالات تنبؤ. وبالعكس فإن وضع العديد من التفاعلات بين زلازل مختلفة الشدة فى الحسبان يؤدى غالبًا إلى الاستعانة بنماذج عدم استقرار مشتقة من الإحصاء الفيزيائى والتى أحيانًا ما يكون فيها عدم التوقع راجعًا إلى عدم الاستقرار. وسوف نرى أن مستوى التنبؤ بالزلازل ربما لا يعود فقط إلى ضعف طرائق المعالجة ولكن قد يكون مرتبطًا أيضًا بأسباب موضوعية.

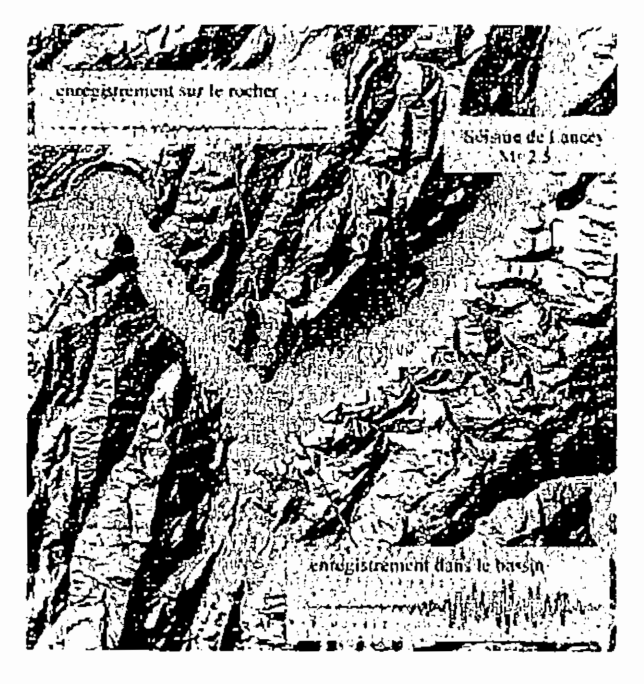
وتمت تجربة العديد من المداخل فى مجال التنبؤ وتم قياس عدد من البارامترات بأمل إمكانية ربط تغيراتها بحدوث زلزال. ومن السلوك الحيوانى إلى كيمياء الانبعاث الغازى مرورًا بتغيرات المجال المغناطيسى، أدت كل المحاولات على أكثر تقدير إلى نتائج ملتبسة، وعلى أى حال، لا توجد طريقة عملياتية operationnelle فى الوقت الراهن. ويشعر علماء الزلازل، وأحيانًا الجمهور الواسع، غالبًا بهذا الموقف كما لو كان إخفاقًا للانضباط لكن سيكون من المثير للاهتمام التساؤل الأكثر عمقًا عن المطلب الاجتماعى الذى يبرر البحث فى علم الزلازل. والنتائج الاقتصادية والاجتماعية لتنبؤ ما تفترض شبه مصداقية مطلقة للعلماء. وتشير حقيقة مصاعب إدراك المقتضيات العلمية والتقنية فى المجالات القانونية والسياسية، إلى أنه من الخداع فيما يبدو على المدى القصير التفكير فى إظهار التنبؤ بالزلازل كما لو كان أمرًا عمليًا. وليس علماء الزلازل أقل نشاطًا فى مجال تأثيرات الزلازل ويشاركون، مع المهندسين، فى استكمال تقنيات تطور تتيح تخفيض التكلفة البشرية الناجمة عن الاهتزازات الأرضية.

وتعطى تجربة الكوارث الضخمة، وخاصة الأكثر حداثة، مؤشرات بالغة الأهمية عن مداخل عملية تتيح الحد من تأثيرات الزلازل. وفى الواقع يتعلق الرصد الأهم والمتكرر بالتباين بالغ الضخامة بين الخسائر فى منطقة معينة. وبالطبع فإن الجوار المباشر لفالق هو عنصر تشديد واضح (الشكل ٤). وتُتهم نوعية الإنشاءات غالبًا بأنها وراء الأضرار الأكثر خطورة. ومع ذلك فبعيدًا عن هذه العناصر، فإنه من الراسخ حاليًا أن أهمية هزات التربة خلال الزلزال تتغير

بسرعة من نقطة إلى أخرى تبعًا لطبيعة الأرض التي يحدث فيها الزلزال. ولا يمكن ذكر هذه التأثيرات دون الإشارة إلى المثال النموذجي الذي يمثل زلزال مكسيكو Mexico في ١٩٨٥. أصيبت المدينة بأضرار بالغة الخطورة أدت إلى وفاة بضع آلاف من البشر. ومع ذلك كان مصدر الهزة الأرضية يقع على مسافة ٣٠٠ كيلومترًا. وكانت الطبقات السطحية للتربة التي أقيم عليها مركز مدينة مكسيكو هي المسؤولة عن التأثير الكبير للتضخيم. وفي الواقع كان مركز المدينة مبني جزئيًا على طين قليل الرسوخ الذي كان يتألف منه قاع بحيرة تم تجفيفها لبناء مكسيكو. وبطريقة أقل تطرفًا، لكنها أيضًا ذات مغزى، تم رصد مثل هذه التأثيرات في زلازل من كوبا إلى اليابان، ومن لوما بريتا في كاليفورنيا إلى لييج Liege في بلجيكا.

ولو أن تأثيرات التضخيم (أو عدم التضخيم) تمثل دائمًا موضوعًا للأبحاث، فإنها تدخل في ظواهر انتشار ورنين الموجات الزلزالية المفهومة جيدًا في الفيزياء. ومع ذلك يظل من المطلوب توضيح بعض الجوانب، مثل موضوع معرفة ما إذا كان إجراء أرصاد للزلازل الصغيرة يمكن استخدامها للتنبؤ بتأثيرات الزلازل الشديدة بسبب السلوك غير الخطي لأنواع التربة المختلفة.

ومع أننا لا يمكننا التنبؤ بحدوث زلزال ولا تعيين قوته، لذلك يمكن منذ الآن رسم خرائط فيما يتعلق بتأثيراته. ويتعلق الأمر بأداة يجب أن تتيح، بتكاليف مناسبة، سياسة تهيئة منطقة مع الأخذ في الاعتبار المخاطر الزلزالية. وتحدث تأثيرات التضخيم (أو عدم التضخيم) في دورات اهتزازات خاصة جدًا. وبالمثل فإن كل نوع من المباني يكون حساسًا لدورات اهتزازات معينة. وكل نوع من التربة يرتبط بكل نوع من الإنشاء ويطابق هذه الحالة قابلية تعرض للمخاطر يجب الإقلال منها. والمبنى المضاد للزلازل سوف يمكن دون شك أن يضاف إلى درجة الاحتياط الأولى هذه.



الشكل (٤)

مثال للتغيرات السريعة لتحركات التربة خلال الزلزال.

والآثار الحمراء تمثل التحرك الأفقى للتربة كما تم تسجيلها عند موقعين البعد بينهما ٢ كيلومتر فى جرينوبل Grenoble. والمسافة من الزلزال مماثلة. ويشير التسجيل فى مركز الوادى الرسوبى إلى أن اتساع ودوام الاهتزازات أكثر قوة بكثير منه فى الصخور. وأصبحت هذه الأرصاد ممكنة بواسطة نشر محطات زلزالية منذ عدة سنوات. والمواقع المختلفة فى جرونوبل مجهزة فى الوقت الراهن بأجهزة قياس التسارع.

ومع أن هذه التأثيرات كانت قد رُصدت وكانت أهميتها مقبولة بشكل عـــام، فإن اللجوء إلى الأسس التى ذكرناها توّا يصطدم بكثير من المصاعب التى تتجاوز التحليل العلمى فقط والتى تشير إلى أن مشكلة الوقاية من الزلازل المخربـــة هـــى بالدرجة الأولى مشكلة اجتماعية لا يسعنا إلا التصدى لها بفعالية من وجهة النظـــر

التقنية فقط. وتعتبر تعبئة جماعة أكثر اتساعًا، تتضمن ما يتعلق بعلم الاجتماع، والعلوم السياسية والقانونية .. أمرًا مهمًا حتى يمكن للاكتشافات العلمية حول الأرض أن تشارك بالفعل فى الحد من تعرضنا للمخاطر فى مواجهة الزلازل.

والمفارقة أنه رغم التطورات المتواصلة فى تقنيات الإنشاءات، فإن الأمثلة الحديثة لمكسيكو أو كوبا توضح لنا أن مجتمعاتنا ليست أقل تعرضًا للزلازل فيما يبدو. ويمثل تطور مناطق مدينية شاسعة مشاكل جديدة. والعديد من هذه المناطق الشاسعة حيث يتركز البشر، والثروات ووسائل الإنتاج، مهددة مباشرة بالزلازل. وفضلاً عن ذلك فإن تلك المدن الضخمة تكون غالبًا، لأسباب عملية واضحة، مقامة على مناطق مستودعات رسوبية وبالتالى فى تضاريس قد تصبح غير ملائمة. والمشكلة المحلية واضحة ولكن الاعتقاد بأن موقعًا جغرافيًا مختلفًا يجعله آمنًا تمامًا من التوابع السلبية للزلازل قد يكون ساذجًا. ونتيجة طبيعية للعولمة هى فى الواقع الارتباط الاقتصادى المتبادل على مستوى الكوكب: إدارة الزلازل الشديدة المقبلة فى طوكيو أو لوس أنجلوس مثلاً، يصبح مخاطرة عالمية.

تحت البراكين[٩]

بقلم: كلود جوبار
Claude JAUPART

ترجمة: عزت عامر

فى نهاية القرن العشرين الذى شهد انطلاقة غير مسبوقة فى المعارف الإنسانية، فقدت البراكين جزءًا كبيرًا من غموضها. ونحن نراقبها منذ زمن طويل وعرفنا الجزء الأكبر من أحداث ظهورها. ونعرف أن البراكين لها من النوع نفسه بشكل عام الثوران نفسه، أيًا كان مكانها. وانتهى منهاج الجرد وغيّر علم البراكين الأفق والمناهج. وتنقل الدراسات الراهنة إلى الفيزياء ظاهرة بركانية وانصرفت إلى العلاقات بين البراكين والمصادر العميقة للصخر البركانى المنصهر.

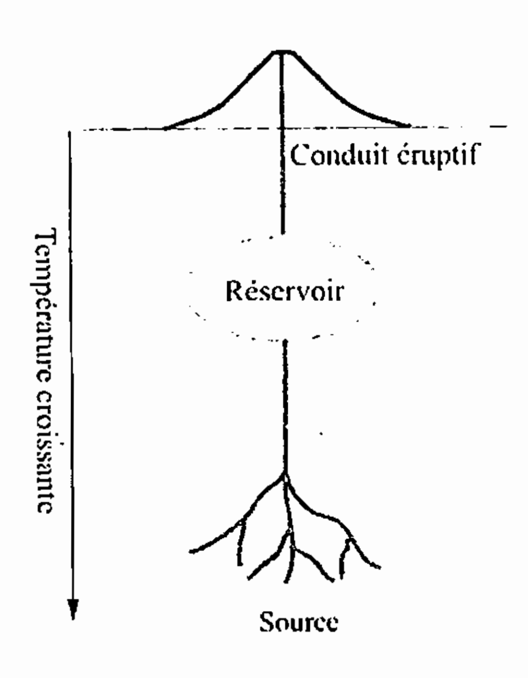
والثوران هو نتيجة لكل سلسلة الظواهر التى تؤثر على الصخور وعلى الصخر البركانى المنصهر عبر سمك عدة عشرات الكيلومترات (الشكل ١). وعلى عالم البراكين أن ينشئ من جديد تسلسلاً معقدًا ويبحث عن تدعيم للقوانين الفيزيائية. وينحو إلى فصل التأثيرات الخاصة والآليات العامة عندما لا يكون لديه سوى معلومات مبعثرة وغير كاملة. وتتشابه كل البراكين وليس من المفيد التركيز على النماذج الخاصة بمجال واحد، أيًا كانت روعتها وتنوعها. وإنه لأمر أيضًا عديم الجدوى السعى إلى دراسة أكبر عدد ممكن. ولماذا، فى الواقع، الوصف التفصيلى لبراكين إيسلاند وإندونيسيا، فى حين أن براكين اليابان وجزر الأرخبيل[١٠] اليابان شبه متطابقة؟ ويجول عالم البراكين العالم كله باحثًا عن نماذج أكثر وضوحًا وعن معلومات تنقصه. ويقوده هذا السعى أحيانًا إلى دراسة براكين

---

(٩) نص المحاضرة رقم ١٩٩ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٧ يوليو ٢٠٠٠.

(١٠) جزر الأرخبيل Aleoutienne: منسوبة إلى الأرخبيل، أو مجموعة الجزر، التى تمتد بين آلاسكا وكامتاشاتكا Kamtachatka فى شمال أمريكا الشمالية. (المترجم)

أحفورية، همدت منذ وقت طويل، التى قطّعتها التعريـــة والانزلاقـــات الأرضـــية وأظهرتها. ويمكنه فى تلك الأماكن أن ينفذ إلى شبكة رصاصية بركانية لا يمكـــن الوصول إليها فى بركان نشيط.



الشكل (١)

مقطع تخطيطى عبر منظومة بركانية.

وليس التكوين سوى الجزء المرئى من شبكة صهيرية magmatique تمتد خلال عدة عشرات من الكيلومترات فى العمق. ويتكون الصخر البركانى المنصهر فى منطقة المصدر وهى ليست ذاتية تمامًا ومُستخرجة بواسطة شبكة من التصدعات. ويصعد الصخر البركانى المنصهر، مدفوعًا بضغط أرشميدس، لأنه أكثر خفة من الصخور المحيطة به، نحو السطح.

وبالقرب من السطح يتراكم الصخر البركانى فى خزان.

ويمكث فى هذا المكان وقتًا محددًا ويتبلور جزئيًا.

ويتم حث الثوران على وجه الحصر بفتق فى جوانب الخزان.

فى وقت التقييم الذى تمثله مؤتمرات جامعة كل المعارف، تتبادر إلى الذهن بضعة أسئلة بسيطة. لماذا لا نعرف البراكين فى الوقت الراهن بشكل مؤكد؟ لماذا، مثلاً، لا يمكننا التنبؤ قبل زمن طويل بثورانها؟ وفى آخر الأمر، لماذا يُحدث كل ثوران جديد هذا القدر من الحماس لدى اختصاصيين الذين يُعتقد بأنهم مطلعون تمامًا على هذا الأمر، أو حتى غير مبالين؟ وللإجابة عن ذلك سوف أقدم ملخصًا موجزًا للمعارف الحالية فى علم البراكين وسوف أوضح كيفية الحصول عليها. وسوف أشير إلى سبب أن الرصد المباشر غير كافٍ لحل المشاكل المطروحة وكيف أتاحت دراسة ديناميكا المنظومات البركانية توجيه الأبحاث. وسوف أناقش فى النهاية المعطيات الناقصة وضرورة متابعة الظاهرة البركانية خلال الزمن. وكل ثوران له تاريخ ثرى بالمعلومات حول المنظومة البركانية العميقة التى تغذيه.

قطع اللغز البركانى

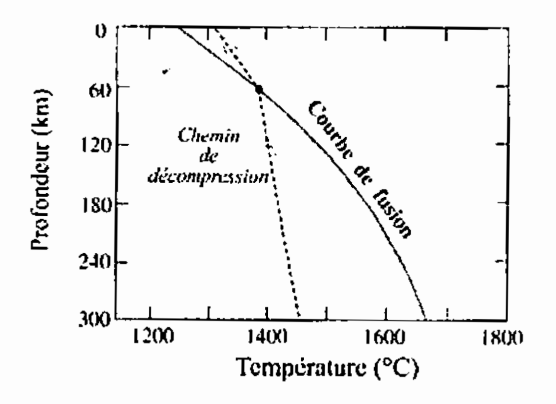
يقذف الثوران البركانى صخورًا بركانية منصهرة، أى صخورًا ذائبة، وغازات من أعماق سحيقة فى الأرض. ولا توجد هذه الصخور فى كل مناطق الكرة الأرضية وتُنتج فى مناطق محددة تمامًا. وفى الواقع يعتبر كوكبنا من الناحية الأساسية صلبًا لأن درجات حرارته تحت نقطة انصهار الصخور. والاستثناء الوحيد هو النواة الموجودة ما بين ٣٠٠٠ و٥٠٠٠ كم فى الأعماق، والمتكونة من حديد سائل لكن لا علاقة لها بالصخور البركانية المنصهرة أو البراكين. ويعود أصل الصخور البركانية المنصهرة إلى التحركات الداخلية التى تقلقل كوكبنا وهى المسئولة عن انحراف القارات. والآلية الأكثر أهمية هى إزالة الضغط: يقترب تيار صاعد من صخور السطح، حيث الضغوط أكثر ضآلة منها فى العمق. وكما يوضح الشكل ٢، تزداد درجة حرارة انصهار صخرة ما مع الضغط: للبريدوتيت،[١١] الصخرة النموذجية للجزء الأكبر من الوحدة الأرضية، الكساء، تكون درجة حرارتها نحو ١٢٠٠ درجة مئوية عند الضغط الجوى وتصل إلى ما

---

(١١) البريدوتيت peridotite: أى من مجموعة صخور بركانية تتألف بشكل رئيسى من الزبرجد الزيتونى والبيروكسين وله بنية كالجرانيت. (المترجم)

يقترب من ١٥٠٠ درجة مئوية عند الضغط السائد عند عمق ١٠٠ كيلومتر. وعندما يكون التيار الصاعد بالسرعة الكافية لا تبرد الصخور بما يكفى وهذا هو انخفاض الضغط الذى يستحث الانصهار. لذلك فإن أى بركان يكون موجودًا دائمًا فوق منطقة نشيطة من الكساء الأرضى.

ويتم صعود الصخور البركانية المنصهرة إلى السطح على عدة مراحل بتدخل آليات كثيرة مختلفة، مثل التى سنراها فيما يلى. إلا أن القوة المحركة، هى دائما القوة نفسها، قوة أرشميدس؛ لأن الصخور البركانية المنصهرة أكثر خفة من الصخور العميقة. وهى التى تشق طريقًا نحو السطح، وليست الصخور التى تنفتح لكى تدعها تمر. وبتعبير آخر، فهى مسؤولة عن صعودها، على عكس التصور الخاطئ، الشائع للأسف، الذى يقول بأننا نطوف فوق محيط من الصخور البركانية المنصهرة الجاهزة لأن تتدفق عند أدنى فتق فى السطح.



الشكل (٢)

رسم بيانى يوضح توزيع درجات الحرارة فى الأرض بالنسبة إلى العمق. ويشير الخط المتصل إلى منحنى الانصهار. والخط المنقط يوضح الطريق الذى تسلكه صخرة تصعد بسرعة إلى السطح. وفى الأعماق البعيدة تكون الصخرة صلدة تمامًا لكنها عند درجة حرارة مرتفعة. وعند صعودها تبرد قليلاً ولكن ليس بما يكفى لتجنب منحنى الانصهار: فتنصهر عند عمق متوسط.

في العمق الرخو تكون الصخور ذات كثافة طفيفة نسبيًا، ولم يحدث ذلك بسبب أنها محطمة، وفى حالات معينة، أقل من كثافة الصخور البركانية المنصهرة الأكثر انتشارًا. وفى هذه الحالة بدون قوة أرشميدس التى تدفعها إلى أعلى، تتراكم الصخور البركانية المنصهرة فى خزانات يطلق عليها الغرف الصخرية البركانية المنصهرة.

وتعتبر الانفجارات البركانية أحداث نادرة. وبعض البراكين لا يحدث لها ذلك إلا كل خمسمائة عام، مثل مونت بيناتوبو Mont Pinatubo فى الفلبين الذى شهد انفجارًا شديدًا فى ١٩٩١. والبراكين الأخرى يكون نشاطها شبه مستقر، مثل سترومبولى Stromboli فى جزر أولين iles Eoliennes فى عرض البحر الإيطالى. كيف يمكن تفسير مثل هذه الفترات المتقطعة؟ الرد معقد، لكن الشيء الأساسى أن نعرف أن المصدر العميق للصخور البركانية المنصهرة نشيط خلال زمن طويل (على الأقل عدة مئات الآلاف من السنوات) وأنه يطلق الصخر البركانى المنصهر باستمرار. وتحث التيارات الصاعدة الكساء الأرضى فى سمك عدة مئات الكيلومترات وهى مستقرة خلال عشرات الملايين من السنوات على الأقل. والمصدر ليس خزانًا ثابتًا يفرغ بالتدريج، لكنه منطقة تعبرها باستمرار صخور ساخنة آتية من الداخل. وتعتمد كمية الصخور البركانية المنصهرة الناتجة على تدفق المادة وليس حجم المصدر. وتُستخرج الصخور البركانية المنصهرة بفضل التصدعات حيث يتجاوز فيها الإنفاق معدل الإنتاج. وفى حالة اختلال التوازن هذه لا يكون التدفق الخارج ثابتًا. وعلى مستوى أعلى للمنظومة، تنحو الصخور البركانية المنصهرة إلى التراكم فى خزان يمتلئ من جديد حتى حد معين. ومن خلال الفتق فى جدران الخزان يطلق الخزان جزء من محتوياته ويستتبع ذلك ثوران.

وتنتج القواعد التى ذكرناها توًا من منطق فيزيائى. ولكى نطبقها على حالة واقعية لبركان طبيعى، يجب توضيح أبعاد الأجزاء المختلفة للمنظومة والتحقق من أن الشروط التى تحكمها هى نفسها التى تم فرضها. مثال لذلك، يمكن لخزان ضخم أن يخزن الكثير من السائل وبالتالى، للحصول على الإنفاق نفسه من المصدر

العميق، يتسبب فى وجود هدوء لزمن طويل بين الانفجارات. وبالمثل فـإن مـدى ضخامة الفتق يحدد إنفاق الصخور البركانية المنصهرة التى يمكنه نقلها، ومن ثـم زمن تصريف المصدر كذلك زمن الصعود حتى الخزان. وبالإضافة إلى ذلك يجب معرفة ما إذا كانت المنظومة تتطور بمرور الزمن أم لا: قد يتسع الخزان، ويمكن لأحداث متكررة من التصدعات أن تُحدث مجرى ذا أبعاد ضخمة. وفى النهاية فإن النظريات المتاحة لهذه الظواهر المتنوعة مبنية على عدد معين من التقريبات التـى تعتبر أساسية لمواجهة أرصاد فى منظومة ذات حجم طبيعى.

الرؤية تحت الأرض

تعتبر تقنيات علم الطبيعيات الأرضية الراهنة عاجزة عن توفير صور ذات دقة كافية عن بنية ما تحت الأرض. ويعتمد علم الزلازل، مثلاً، على دراسة أزمنة مسارات الموجات المرنة عبر الصخور. ولكل نوع من الـصخور قـيم خاصـة لسرعة انتشار الموجات. وبالفحص عن طريق التسمع لمنطقة ما من زوايا مختلفة، يمكن من حيث المبدأ حساب توزيع السرعات فى العمق ومن ثـم رسـم خريطـة للوحدات المختلفة تحت الأرض. وعند التطبيق تفشل هذه الطريقة لأنها لا تكـون بالدقة الكافية. وفى الواقع تكون التصدعات ضئيلة، والمجارى البركانيـة ضـيقة والخزانات صغيرة: بضعة أمتار للأولى، وبضع عشرات الأمتـار للثانيـة وفـى النهاية بضع كيلومترات على أكثر تقدير الأخيرة. ويضاف إلى ذلك أن الـصخرة البركانية المنصهرة هى صخرة سائلة تقترب خصائصها الفيزيائية مـن الـصخور المجاورة الصلبة. وفى هذه الأحوال تكون الاختلافات فى أزمنة مسار الموجـات التى تمر أو لا تمر خلال خزان ما طفيفة. ورغم الجهود الهائلة فـإن الخزانـات الصهارية تفلت أيضًا من أدوات الرصـد لـدينا. وبـالأحرى تكـون المجـارى والتصدعات غير مرئية تمامًا، وتكون خارج موضـوع تعيـين حالـة الـصخرة البركانية المنصهرة التى ترقد فى خزان بركان ساكن مؤقتًا.

ولا تكون الأجزاء المختلفة من منظومة بركانية مرئية ابتداء من السطح. ولكى نأخذ تشابهًا طبيًا، لا يمكن للمرء أن يقوم بالتشريح أو يجرى فحص بجهاز ماسح، أو يسبر الأعماق. ولا يبقى لنا سوى بضعة قياسات غير مباشرة، بضع أعراض سطحية، وقواعد الفيزياء وفى النهاية دراسة الجثث البركانية، أو بتعبير آخر المنظومات الأحفورية التى جاءت بها التعرية إلى السطح. وتتمثل العقبة فى أنه، فى كل حالة، لا يمكننا رصد سوى جزء صغير من المجموعة. ولكى نعيد إنشاء منظومة بأكملها، من الضرورى الوصول إلى مناطق مختلفة ودراسة تكوينات لأعمار مختلفة. وبالطبع فإن الأجزاء موضع التحليل لا تتطابق تمامًا، ويشابه عمل عالم البراكين إعادة تركيب لغز صور منفصلة انطلاقًا من أعمال ناقصة ومستويات مختلفة.

وفى عمان وفى كريت وفى مناطق أخرى من العالم، وبفضل التعرية، يمكن أن نرصد على السطح قطاعًا يقترب ارتفاعه من عشر كيلومترات عبر الكساء الأرضى. وتحت تكدس سيول الحمم يوجد تكوين معقد من عروق رأسية تستند إلى بعضها البعض. ويصل طول كل عرق إلى نحو متر ويكون مليئًا بالصخر البركانى المنصهر الصلد، ومن الزجاج: هذا هو كل ما تبقى من تصدع غذى ثوران فيما مضى. وتشكيلات العروق المعقدة هى نتيجة عدة عمليات حقن صخر بركانى منصهر التى كانت تغذى سيول الحمم. ورسخت العروق فى صخور جوفية، وتكونت بسبب تبلور بطئ لحجم ضخم من الصخور البركانية المنصهرة، وبقول آخر من الغرفة الصهارية. وفى مستوى أكثر انخفاضًا فى القطاع، تصادفنا صخور خاصة تمامًا، تبدو مثل شبكة من الألياف البيضاء تصنع خطوطًا لقالب ضارب إلى السواد. حينئذ نكون فى منطقة المصدر القديم والألياف هى البقايا المتصلبة للقنوات الدقيقة جدًا التى سمحت بسيلان واستخراج الصخور البركانية المنصهرة.

والمنظومة البركانية التى وصفناها توًا تمتد عبر سمك بضع كيلومترات فقط، لكنها مسؤولة عن الكميات بالغة الضخامة من الصخور البركانية المنصهرة المنطلقة من الأرض. وتعمل هذه المنظومة فى الظهائر المحيطية التى تجتاز الأعماق البحرية. والمنظومات البركانية القارية أكثر غموضًا لأننا لا نستطيع

رؤيتها فى مجملها: فهى أكثر ضخامة ولا يمكن للتعرية أن تظهرها تمامًا. وبالعكس يمكن الاهتداء إلى عناصرها المختلفة مبعثرة فى الأقاليم الجيولوجية المختلفة. وبالنسبة للعروق والقنوات البركانية، فإن المناطق القاحلة فى جنوب غرب الولايات المتحدة الأمريكية تتيح أمثلة غير مألوفة. يمكننا أن نرى هناك بقايا الحمم البركانية المتصلبة التى تسد فوهة البركان الخامد necks، أى قنوات بركانية متصلبة انتصبت فوق الأرض لأنها أكثر مقاومة للتعرية مقارنة بالصخور الرسوبية التى عبرتها. والمثال الأكثر شهرة هو صخرة السفينة ship rock فى حالة المكسيك مرة ثانية. ويمكننا أيضًا الإعجاب بالسدود البركانية dykes، التى تبدو كما لو كانت أسوارًا طبيعية طولها عدة كيلومترات وسمكها بضعة أمتار وهى تصدعات مليئة بالصخور البركانية المنصهرة الصلدة. ويمكننا فى النهاية التنزه فى كتل جوفية، التى تحتفظ فى كتلتها المتبلورة بالعديد من أثار سيلان الصخور البركانية المنصهرة. وتجعلنا تشكيلاتها الداخلية نفكر فى تشابهها مع التركيبات الرسوبية، بمقاعدها ومضاجعها، وتجعيداتها وفجواتها (مناطق فى حالة فوضى). وبالعين المدربة يمكن كذلك التنزه داخل مرجل بركانى قديم.

من جانب آخر من الممكن دراسة مجرى بركانى أحفورى خلال ارتفاع عدة مئات من الأمتار. والمثال الأكثر جمالاً موجود على حدود ولايتى نيومكسيكو وأريزونا، حيث القنوات الحديثة مشقوقة من البراكين القديمة. وعند تسلق المنحدر الصخرى المحيط بأحد تلك القنوات، يمكننا ملاحظة التغيرات التى تعرضت لها الصخور البركانية المنصهرة عندما اقتربت من السطح وخففت الضغط. ومن الممكن أيضًا أن نقتنع بأن المجرى البركانى ليس أنبوبًا رأسيًا بجوانب ملساء تمامًا لا ينفذ منها شىء. وفى أماكن كثيرة، تكشف تصدعات صغيرة مليئة بالصخور البركانية المنصهرة الصلدة وبالرواسب التى تركتها الغازات الساخنة، عن مجرى رئيسى وتكتسح الصخور المحاصرة. ونتعرف فيها على الشقوق التى تركت الغاز البركانى يهرب والتى غذت يحموم[١٢] البركان القديم.

---

(١٢) اليحموم fumerolle: فتحات فى قشرة الأرض يتصاعد منها بخار الماء وبعض الغازات فى المناطق البركانية بتأثير الضغط. (المترجم)

استعمال الآليات الطبيعية

يتدخل فى نشاط البركان عدد من الآليات الطبيعية شديدة التنوع ويحتاج الأمر إلى مجموعة ضخمة من الطرائق والمناهج لتحليل هذه الآليات. فلنبدأ بالمصدر مرتفع الحرارة، حيث الصخور البركانية المنصهرة موجودة فى مسام وفجوات قالب صخرى. وتُستخرج الصخور البركانية المنصهرة منه لأنه أكثر خفة. ولدراسة هذه الظاهرة وحساب معدل هذه الصخور، تجب معرفة أشكال وأبعاد المسام والفجوات، وأن نضع فى الحسبان فى آن واحد آليتين مختلفتين: سيلان سائل فى شبكة قنوات بالغة الصغر وتشوه القالب.

وبالقرب من السطح تكون درجات الحرارة طفيفة وتتصف الصخور بسرعة الانكسار. وقد تتشوه إلى حد بعيد فى نظام مرن وتنهار إذا تجاوزت حد التشوه. وعند الوصول إلى هذا الحد تُحدث تصدعات تنتشر نحو السطح. وهذه الآلية غامضة لأنها تُحدث تأثيرين متنافسين يعتمدان على الضغط: الاحتكاك اللزج فى الصخر البركانى المنصهر والتشوه المرن للصخور المحاصرة. ويتم دفع السيلان بتغير تدريجى للضغط ويعتمد حجم الصدع على الضغط المحلى الزائد فى الصخر البركانى المنصهر. وكلما حدث ضغط زائد فى المصدر، كلما زادت سرعة السيلان وكلما كان انخفاض الضغط شديدًا، ومن ثم يصبح الضغط الزائد ضئيلاً عند مسافة معينة. غير أنه بدون تشوه مرن، لا يمكن للتصدع أن ينفتح ولا يسمح بمعدل ذى قيمة. وهنا أيضًا يجب على عالم البراكين أن يعالج فى آن واحد آليتين بقانونين مختلفين تمامًا، بدون أن يستطيع تجاهل أى منهما. والتفاعل بينهما يحدث سلوكيات خاصة جدًا التى تعطى خصوصية للنظم البركانية.

وبفضل هذه التصدعات تُحمل الصخور البركانية المنصهرة من المصدر العميق إلى الخزان السطحى (الشكل ١)، أو تمتزج بالخليط الموجود. ويزداد حجم الخزان بسبب التشوه وزحزحة جدرانه. وفى النظام الهش سريع الانكسار، يمكن للحجم أن يزداد طالما لم يصل إلى حد التصدع. ويمكن القول بأنه كلما زاد حجم

الخزان، أصبحت الكمية المختزنة ضخمة. وبالنسبة لمعدل مصدر محدد يشير هذا التفكير المنطقى إلى أن الفترة الزمنية بين انفجارين والحجم المنطلق من كل منهما دالتان متزايدتان لحجم الخزان.

تغيرات الصخور البركانية المنصهرة عند صعودها

لدى وصول الصخور البركانية المنصهرة إلى السطح فإنها تشهد تغيرات هائلة فى الخواص (الشكل ٣). وتحتوى وهى فى الخزان على عناصر سريعة التبخر ذائبة بسبب الضغط الشديد السائد فى الخزان. وعند صعودها فإنها تتعرض لتحلل وتصل إلى ضغط تشبع لا تستطيع هذه العناصر تحت هذا الضغط أن تظل فى حالة ذوبان. وعند هذا الحد تظهر مرحلة غازية على هيئة فقاعات متناثرة فى سائل الصخور البركانية المنصهرة. وبالتدريج حين ينخفض الضغط، تزداد كمية الغاز وتتضخم الفقاعات: إنها حينئذ رغوة تتسرب بسرعة كبيرة فى المجرى. ويكون هذا التسرب غير مستقر وتنتهى الفقاعات بأن تنفجر. وهذه الظاهرة، التى يطلق عليها "التكسر fragmentation"، تغيّر تمامًا الخليط البركانى، الذى يأخذ شكل شذرات الصخور البركانية المنصهرة المعلقة فى نفثة غاز. ويشهد السائل الكثيف اللزج فى الخزان تحولين يمثلان مشاكل نظرية جمة.

Jet de gaz
portant des
fragments
de magma

Fragmentation

Magma
portant
des bulles
de gaz

Nucléation et
dilatation
de bulles de gaz

الشكل (٣)

رسم بيانى يوضح التحولات التى يتعرض لها صخر بركانى منصهر غنى بالعناصر سريعة التبخر عند صعوده فى مجرى بركانى. ويحث انخفاض الضغط التجمع النووى لفقاعات الغاز وتضخمها ثم تكسير الصخور البركانية المنصهرة.

ولا يكون الوصف السابق مقبولا إذا كان الصخر البركانى المنصهر فقيـرًا بالعناصر سريعة التبخر. وفى هذه الحالة لا تكون الشروط الـضرورية للتكـسر مجتمعة وهى حالة حمم بركانية تسيل خارج مجرى بركانى.

وليس من السهل فهم آليات التجمع النووى لفقاعات الغاز ونموها فى سـائل لزج أيضاً على هيئة صخر بركانى منصهر، رغم الأبحاث بالغة الكثرة. غير أنـه من الواجب أخذ تلك الآليات فى الاعتبار فى حساب الـسيلان ecoulement. وإذا أخذنا مجرد مثال، فإن الفقاعات تتمدد لأن ضغطها يكون أكثر ارتفاعًا من الـسائل المحيط بها. وبناء عليه ففى حالة ثوران فيه حمم منصهرة تكون الغازات البركانية تحت ضغط عند مخرج المجرى البركانى ويؤدى تمددها العنيف إلـى انفجـارات خطيرة. ويبحث عالم البراكين عن تحديد فى أية شروط يكون ضغط الغـاز أكثـر

قوة وقد يأمل فى التنبؤ بقيمته فى كل حالة خاصة. وتظهر مشاكل مماثلة فى صناعة الزجاج ولم يتم حلها بعد على المستوى النظرى. ومن جانب آخر فإنه يتم الحصول على المصنوعات الزجاجية بتصليد الصخور المنصهرة فتصبح رائعة وجيدة الصنع فى نوع من منظومات الصهر! وإنه لأمر مفيد من جانب آخر المقارنة بين المهندس الذى يحسن طريقة صناعة ما وعالم البراكين الذى يحلل عمل بركان. يمكن للمهندس أن يكتفى باستيعاب كمى للظواهر المستخدمة. وبفضل ذلك يمكنه ضبط طريقته لأنه يعرف فى أى اتجاه تؤثر تلك القيم المختلفة لمتغير ما أو تلك التغيرات فى أسلوب العمليات. وليس لدى عالم البراكين مثل هذه المرونة: ليس لديه سوى ثوران وهو عاجز عن أن يغير البارامترات بقدر ما يشاء. وإذا وجاهته مشكلة ناتجة عن ظاهرة خاصة، لا يستطيع التخلص من هذه المشكلة أو إلغاء نتائجها. وهو مضطر لإخضاع النظرية بغرض حساب قيم كل المتغيرات لديه. مازلنا أيضًا بعيدين جدًا عن هذه الموضوعية....

التغيرات عبر الزمن

يتطور البركان باستمرار عبر الزمن ويسلك كما لو كان مفاعلاً كيميائيًا يتغير فى قلبه تركيب الصخور البركانية المنصهرة، وبالتالى تتغير خصائصها الطبيعية. وتعمل ثلاثة آليات فى الخزان. تبرد الصخور البركانية المنصهرة وتتبلور. وتعتبر سائلاً ذى عدة مكونات وليس لبلوراتها التركيب نفسه. وبالتالى فإن الصخور البركانية المنصهرة المتبقية يتغير تبلورها أيضًا بالتدريج. ومن جانب آخر، فإنها تختلط بالصخور البركانية المنصهرة القادمة من المصدر. والآلية الثالثة تتعلق بالعناصر سريعة التبخر مثل الماء وثانى أكسيد الكربون. وتكون هذه العناصر الموجودة أسفل الصخور البركانية المنصهرة الطبيعية ذات تركيز منخفض. وعند البرودة لا تستطيع البللورات أن تحتوى على هذه العناصر ولا يقبلها سوى السائل المتبقى: لذلك يزداد تركيزها بمرور الزمن بآلية تشبه التقطير. وخزان أى بركان يكون غير متجانس ويمكن أن يشتمل على مرحلة غازية.

وليست تغيرات تركيب الصخور البركانية المنصهرة المختزنة في الخزان مجرد فكرة خيالية: يمكن قياسها مباشرة في مواد الحمم المنصهرة التي تتراكب علي السطح. وبفضلها يمكن العودة في الزمن. وبالقرب من مركز بركاني يمكن بذلك العثور بوجه عام على مواد بزلتية منصهرة في القاعدة، وهي الصخور البركانية المنصهرة "البدائية" الناتجة عن مصدر عميق، ثم نجد بعد ذلك حمم أكثر غزارة بعناصر معينة مثل الصوان والتي اشتقت من بزلت بالتبلور التجزيئي. ويعطي تحليل هذا التسلسل وتحليل الأحجام المناظرة معلومات حول حجم الخزان. ومن ناحية أخرى بتأريخ كل مادة منصهرة يمكن تعيين سرعة تطور المنظومة. ومن المعروف أن المنظومة البركانية تكون في حالة نشاط خلال عدة آلاف من السنوات. ومن ثوران إلى آخر يمكن أن تتغير الصخور البركانية المنصهرة وكمية الغاز. ومن جانب آخر، نادرًا ما يكون الخزان متجانسًا ومن هنا نصل غالبًا إلى أن تركيب الحمم يتغير خلال الثوران نفسه، جاذبة تغيرات في النظام البركاني.

عمل عالم البراكين

يستعير علم البراكين اتجاهات بحث متنوعة تمامًا ويجمع اختصاصيين مختلفين. فيدرس علماء نظريات محددين السيلان وسلوك خليط من سائل وفقاعات غاز، ويهتم آخرون بمجالات الإجهاد والتشوه، ويبحث آخرون في النهاية في تفسير آلية التكسر والتنبؤ بأحجام قطع الأحجار البركانية المنصهرة الناتجة. ويحدد علماء فيزياء الخصائص الطبيعية للصخور البركانية المنصهرة والغاز البركاني، وكذلك قوانين قابلية العناصر سريعة التبخر للذوبان. وينقل آخرون المنظومات البركانية إلى نماذج مختزلة يستخرجون منها قوانين يعممونها على الحالات الطبيعية. ويعيد علماء الجيولوجيا إنشاء التتابعات البركانية وتاريخ البراكين المنتقاة جيدًا. ويستخدم علماء الكيمياء المناهج المختلفة لرسم المعالم من أجل تعيين ضغوط خزانات الصخور البركانية المنصهرة وسرعات صعودها. وليست هذه القائمة مستفيضة وتوضح أقصى تنوع للمداخل.

وفى البركان يبحث عالم البراكين عن تعيين قيم المتغيرات الفيزيائية والكيميائية الأكثر أهمية، وعن إعادة تلك الانفجارات البركانية الحديثة فى تاريخها، وأخيرًا عن تحديد خواص هذه الانفجارات، كذلك أنظمتها، ودوامها، والكتلة الكلية للمادة المنطلقة كل مرة. وخلال أى انفجار، يحاول عالم البراكين أن يتتبع تغيرات النظام وقياس التغيرات الزمنية للمعدل. ويمكنه فى هذه الحالة أن يأمل فى اختبار نماذجه الفيزيائية والتحقق من فرضياته. ومن جانب آخر، فإنه يبحث فى الربط بين البركان والظواهر الجيولوجية الأخرى التى تؤثر على المنطقة. ويعتبر تسلق بركان أمرًا مثيرًا للحماس لكنه لا يأتى بشيء ذى أهمية. والظواهر المهمة تنتج على مقياس أكثر أهمية بكثير ولا يمكن رؤيتها بالعين.

ومعرفة عمل أية منظومة هو الربط بين العلة بالمعلول، لكنه أيضًا معرفة ما نقيسه. فلا يمكن الاكتفاء بمراقبة البراكين باستخدام أجهزة أكثر فأكثر تعقيدًا بدون معرفة مصدر الإشارات المنبعثة. ويواجه المدخل التجريبى دائمًا حدوده. وعلى وجه الدقة فإن الثوران المختلف عن الانفجارات السابقة هو الذى يمثل الأخطار الأكثر جسامة. والقول بأن بركان على وشك الثوران لا يكفى ويجب أيضًا تقدير المدى، والنظام والدوام. وبجوار بركان فى مرحلة الانطلاق، فإن الفعل الوحيد الممكن هو الإخلاء. ومع الأخذ فى الاعتبار المخاطرات الاقتصادية والاجتماعية الهائلة، من المحتم السيطرة على عامل الزمن: إبقاء كل السكان بعيدًا عن المدن والبيوت غير ممكن خلال زمن طويل.

ومن وجهة نظر المعرفة الأساسية، فإن معرفة كيفية ظهور وتطور منظومة بركانية، يتمثل فى فهم كيف غيّر كوكبنا بنيته الداخلية وكوّن قاراته. وأيضًا فهم تكوّن أغلب الطبقات المعدنية التى تمثل ثروة الجنس البشرى. وفى الواقع فإن الطاقة الحرارية المنطلقة من الصخور البركانية المنصهرة تحافظ على دورانات المياه الساخنة التى تغسل معادنها وتعيد ترتيبها فى أماكن خاصة.

فى مواجهة تعقد الأحدث البركانية، فإن الاتجاه الطبيعي يتمثل فى قياس عدد من المتغيرات يتزايد بلا توقف. ويعيّن عالم البراكين الحديث موضع الهزات الزلزالية، ومن خلال تحديد الخصائص، يقيس التشوه، ودرجة الحرارة، وتركيب اليحموم..إلخ. وبتكاثر القياسات، يبحث فى مقارنة المعلومات المختلفة والتحقق من تشخيصه. وبفضل هذا الجهد، يعرف فى الوقت الراهن كيف يعين استيقاظ بركان ويتابع الصخر البركانى المنصهر وهو آخذ فى شق طريقه نحو السطح. وبعدد كاف من الأجهزة يمكنه حتى أن يتنبأ بموضع الثوران وتاريخه ببضعة أيام مقدمًا. غير أنه يبقى عاجزًا عن التنبؤ بخصائص الثوران، مثل المعدل والدوام، وهى التى تحدد فى هذه الحالة مدى الأضرار والمساحة المتأثرة. ويتطلب التنبؤ بهذه المتغيرات فهم الظاهرة البركانية، ومعرفة المتغيرات الأساسية وهى الضغط وحجم الخزان، وأبعاد المجرى البركانى.

يتم إطلاق الصخر البركانى المنصهر نحو السطح لأن الخزان البركانى يكون تحت ضغط. وفى هذه الحالة يتم تعيين الحد الأقصى للضغط الزائد بحد مقاومة الحوائط، ومن المعروف أن هذا الحد مستقل تقريبًا عن تركيب الصخور. من ذلك نستنبط نتيجة أساسية: كل الانفجارات البركانية تشترك فى قيم مماثلة لضغط الخزان. لذلك فإن الاختلافات بين النظام البركانى والمعدل لا يأتى إلا من خصائص فيزيائية للصخور البركانية المنصهرة، من محتواها سريع التبخر وحجم المجارى. وقد تبدو هذه القائمة طويلة، وتطرح مشكلات صعبة بالفعل بالنسبة لإعداد نموذج فيزيائى تفصيلى و"مضبوط"، لكنها تستبعد أحد مكونات المنظومة. فمن المعروف أن الخصائص الفيزيائية للصخور البركانية المنصهرة تختلف كثيرًا من تركيب إلى آخر وهذه الحقيقة فى حد ذاتها قادرة على تفسير الكثير. مثال لذلك، لزوجة حمم الريوليت،[١٣] الغنى بالصوان، والأقوى أكثر من مائة ألف مرة

---

(١٣) ريوليتية rhyolitique: الريوليت صخر نارى بركانى حمضى دقيق الحبيبات. (المترجم)

من لزوجة البزلت. ويثبت الدليل من جانب آخر أن حجم المجرى بارامتر أساسى، وهو ما لا نعرف لسوء الحظ قياسه فى الوقت الراهن.

وتبين النماذج الفيزيائية أن الثوران "الانفجارى"، أى الغنى بالغاز، يمكن أن يكون له مسلكان مختلفان تمامًا فى الغلاف الجوى. فالخليط الخارج من فتحة التنفيث أكثر ثقلاً من الهواء ويُقذف به إلى أعلى بسرعة عالية. والعمود الجوى يكون مضطربًا ويخلط الهواء كلما ارتفع بسبب الدوامات. ويغتنى الخليط البركانى بالغاز ويخف. وبقدر ما يظل أكثر ثقلاً من الهواء تخف سرعته تحت تأثير الوزن. وإذا انعدمت سرعة صعوده المتعادلة مع سرعة هبوطه، يسقط نحو الأرض وينحدر من ميول البركان فيما يطلق عليه نظام "الانسياب البركانى الفُتاتى pyroplstique". ومن المحتمل أن يكون هناك نظام آخر إذا أصبح الخليط البركانى أكثر خفة من الهواء. وفى هذه الحالة، يتم دفع النفثة البركانية بقوة أرشميدس، بطريقة دخان مصنع، وقد تصل إلى ارتفاع عالٍ جدًا فى الغلاف الجوى. وأُطلق على هذا النظام "العمود البلينى" تكريمًا لاثنين يحمل كل منهما اسم بلينيوس،(١٤) الأرشد والأصغر، اللذين شهدا الثوران البركانى المروع فى فيزوف الذى دمر بومبى وطمر مبنى هركولانام Herculanum عام ٧٩ بعد الميلاد. وإنتاج السلوكين بالحساب يعتبر اليوم أمرًا سهلاً ويتيح البارامترات المهمة. ولهما ثلاثة أرقام: السرعة عند مخرج التنفيس، وأبعاد هذا المخرج وكمية الغاز البركانى فى الخليط البركانى.

وتأثيرات النظامين تكون مختلفة تمامًا. وينحصر اتجاه الانسياب البركانى الفتاتى بواسطة الأودية ويكتسح كل شىء فى طريقه. لكنه يظل مركزًا ولا يؤثر إلا فى سطح ضعيف. ويصرف العمود البلينى تدفقًا يشبه الصخور البركانية

---

(١٤) بلينيوس Pline: ٢٣ - ٧٩م) عالم رومانى صاحب موسوعة "التاريخ الطبيعى" يُعرف بالأرشد، ولقد قُتل فى الثوران البركانى فى فيزوف ٧٩م. وبلينيوس (٦٢ - ١١٣م) قنصل وخطيب رومانى ترك مجموعة ضخمة من الرسائل الشخصية التى تتميز بقيمة أدبية كبرى، ويُعرف بالأصغر. (المترجم)

المنصهرة على ارتفاع عال، أو يشتته دوران الهواء. ولقد أمكن التدليل على أن الرماد الأكثر نعومة لثوران عام ١٩٩١ فى بيناتوبو فى الفلبين، دار عدة مرات حول الكرة الأرضية. لذلك فإن تأثيرات الثوران تكون مخففة ولا تكون بشكل عام مهلكة. فنعثر مثلاً على آثار ثوران سانتورين Santorin عام ١٦٠٠ قبل الميلاد على مسافة أكثر من ألف كيلومترًا. والكتل المنطلقة فى كل من الحالتين متماثلة. وحيث إن الأسطح المتأثرة مختلفة تمامًا، فإن سمك الرواسب يتغير بالتالى. وبالقرب من نابولى، فى إيطاليا، يمكننا أن نرى فى مناطق عدة طبقات شظايا بركانية من ثوران ٧٩ ميلادية فى فيزوف. وتركت المراحل البلينية شطآن بسمك مترين أو ثلاثة أمتار منتظمة تمامًا والتى تكونت ببطء تحت وابل من أحجار الصقل والرماد. ومراحل الانسياب البركانى الفتاتى، بالعكس، ذات سمك عدة عشرات المترات وتطلق حالات ترسيب عشوائى مختلطة بالتراب وكتل ضخمة من الصخور مُقتلعة من البركان.

وتوضح النظرية أنه فى حالة معينة قد يعود انتقال نظام إلى أخر إلى تغيرات طفيفة للأحوال البركانية. ومن المتوقع وجود تعاقب بين الانسيابات البركانية الفتاتية والأعمدة البلينية. وبالنسبة للراصد، فإن مثل هذه التغيرات تعتبر فى غير أوانها وغير متوقعة وبالتالى فى غاية الخطورة. وهذا من جانب آخر ما قضى على بلينيوس الأرشد بالقرب من بومبى. وتبعًا للسيرة فإنه كان ماكثًا بالقرب من بركان نشط تمامًا للرصد (فى الحقيقة، تبعًا للرواية التفصيلية لابن أخيه، فإنه كان بدينًا وتبرم من الانتقال). وأمكن إعادة تصور كل مراحل هذا الثوران وتسلسل أحداثها بفضل الترسيبات وبفضل أخبار بلينيوس الأصغر. ومن المعروف فى الوقت الراهن أن المراحل الأولى التى كانت بلينية، اتسمت بسيل من التراب وروائح الكبريت القوية: اتسمت بأحوال منفرة لكن يمكن احتمالها. ولم يحاول بلينيوس الأرشد مغادرة المدينة لأنه لم يكن يعرف أن فيزوف قد يغير نظامه. وصار انسيابًا بركانيًا فتاتيًا وهو ما أودى به، والذى كان فتاكًا بالنسبة لكل مدينة بومبى Pompei.

ويعتبر تعيين خصائص الثوران أمرًا ضروريًا لتقييم تأثيره علـــى المنـــاخ. ومن المعروف منذ عشرين سنة أنه يمكن للثوران أن يغيـــر باســـتمرار درجـــات حرارة الهواء المرتفع والدورات الموسمية. وحتى تكون التأثيرات الجوية مهمـــة، يجب أن يطلق البركان منتوجاته فى طبقة الاستراتوسفير، أى على ارتفاع أعلـــى من عشرة كيلومترات. والمتغيرات المهمة هى الارتفاع الذى تصل إليـــه ســـحب أعمدة الدخان البركانية وكمية الكبريت المنطلقة، التى تعتمد بدورها علـــى الكتلـــة الكلية للصخر البركانى المنصهر وتركيزه فى الكبريت. ومن ثم فإنها ثلاث كميات تلك التى يجب معرفتها. والثالثة فقط هى التى يمكن تقديرها انطلاقًا مـــن قياســـات على الحمم. وليست الكميتان الأوليتان خصائص ذاتية للصخر البركانى المنصهر، وتعتمدان على ديناميكا مجمل المنظومة البركانية، أى على القوى الفاعلـــة وأبعـــاد المكونات المختلفة.

هل مازال من النافع دراسة الثوران؟

مع تقديم هذا العرض يمكن التيقن من أننا قد وصـــلنا إلـــى مـــستوى مـــن المعرفة كافٍ وأنه لا فائدة من الذهاب أبعد من ذلك. لم تكن الظاهرة البركانية أكثر استحقاقًا للأبحاث المتنامية وكان يكفى جرد ومراقبة البراكين الخطيـــرة لكوكبنـــا. وفى الحقيقة كان تحت تصرفنا القليل من قياسات تسلسل ثـــوران ويعتبـــر تقـــدمنا بطىء فى هذا النطاق. والانفجارات البركانية نادرة وتحدث غالبًا فى المناطق التى يصعب الوصول إليها حيث من المستحيل نشر شبكات رصد وقياسات. ومن جانب آخر، لم توجد الأجهزة الضرورية إلا منذ بضع عقود. ويمكـــن التـــأريخ لبـــدايات العصر الحديث لعلم البراكين فى عام ١٩٧١، عنـــدما درس المرصـــد البركـــانى بالتفصيل ثوران بركان كيلاوى Kilauea. وتتيح القياسات التى جمعـــت متابعـــة سيرة الصخر البركانى المنصهر فى قلب التكوين، وقياس تدفق الحمم عند مخـــرج مجرى وتوضيح العديد من تغيرات النظام. وبفضل الانفجارات البركانية التى تـــم تتبعها بهذه الطريقة، علمنا كيفية سلوك بركان من هذا النوع. وكان ثوران مونـــت

سانت هيلين Mount St Helens، عام ١٩٨٠ فى سلسلة شلالات الساحل الغربـــى للولايات المتحدة الأمريكية، على قدر كبير من الغنى بالإفادات لأنه كان من نـــوع مختلف تمامًا ونتجت عنه حمم أكثر لزوجة بكثير وكانت غنيـــة بـــالمواد ســـريعة التبخر. ومن جانب آخر، فإنه امتد خلال تسع سنوات واتضح أنـــه، فـــى خـــزان الصخور البركانية المنصهرة، تغيرت الأحوال بالتدريج. ولقد تغيرت كثيرًا تقنيات القياس التى استخدمت باستمرار فى هاواى، قبل استخدامها فى العمليات فى مونت سانت هيلين.

وحتى عام ١٩٩٥، قدم هذان الانفجاران مثالين نموذجيين وأعاد الكثير مـــن علماء البراكين التفكير في رواسبهما المفضلة لإعادة تفسيرها. وفى العام الحـــالى أدى ثوران بركان سوفريير هـــيلس Souvriere Hills فـــى جزيـــرة مونتـــسيرا Montserrat فى الكاريبى، إلى تغيير الأمر كله. ولقد استيقظ هذا البركان الصغير بعد بضع مئات السنوات من الهمود وعرض ثورانًا من نوع غير معروف. كانـــت حممه كثيفة بدرجة لا تُصدق: كانت تحتوى على أكثر من ٦٠ فـــى المائـــة مـــن البلورات وكانت صلدة بالفعل. ومن جانب آخر فإن الثوران تفاقم مع تدفق متزايـــد ببطء شديد خلال عدة سنوات. والسلوك المألوف فى اتجاه عكسى: تدفق مـــنخفض يعود إلى تفريغ الخزان مع انخفاض فى الضغط المناظر. وفى مونتسيرا تم إحلال أفضل التجهيزات فى علم البراكين فى العالم لقياس بارامترات الثوران والتقطـــت مجموعة من القياسات التى أدت إلى بهجة للاختصاصيين خلال سنوات طويلة.

الخلاصة

تعتبر الظاهرة البركانية ظاهرة مفهومة تمامًا فى الوقت الراهن ونعرف كيف نعين النظم الرئيسية. وبالطبع فنحن لم نحط بعد تمامًا بكل التحولات وستكون هناك حاجة إلى الكثير من الأعمال لاكتشاف الأسرار الأخيرة. ومع ذلك فإن معلوماتنا، فى هذا النطاق، واضحة وبرنامجنا للعمل توقف عدة سنوات. وهناك تحدٍ آخر من الآن فصاعدًا: يتعلق بالهبوط نحو الخزان، ثم نحو منطقة المصدر. ومن أجل التقدم يجب علينا تعيين أبعاد وبنية شبكة الأنابيب تحت الأرض. وفى الواقع، كيف يمكن فهم منظومة دون أن نستطيع رصدها؟ وكيف ننشئ نموذجًا كميًا دون أن نعرف أبعاده وبنيته؟ وفى الوقت الراهن، نقتصر على العمل بلا تبصر والعمل بالتجربة والخطأ. ويمكن أن ندرك بلا عناء أن مثل هذا المنهج لا يتيح الوصول بسرعة إلى النتيجة!

ولقد فقدت البراكين قدرًا كبيرًا من غموضها، لكنها احتفظت بقدرة كبيرة على الفتنة لأنها تجعلنا نستشف العالم الجحيمى المهيمن على ما تحت أقدامنا. وبالطبع هذا هو العالم الذى يحتل قلب الأعمال الراهنة.

دورة المياه
والتناسب بين الاحتياجات والمصادر
فى القرن ٢١ (١٥)

بقلم: جيسلين دو مارسيلى
Ghislain De MARSILY

ترجمة: عزت عامر

تعمل دورة المياه، التى تمدها بالطاقة "الماكينة" الحرارية الشمسية، على تبخير الماء من القارات والمحيطات، ونقلها بضعة أيام فى الغلاف الجوى، ثم إسقاطها على هيئة مطر. وسوف نقدم الأرقام الرئيسية لأحجام الماء السنوية التى تجوب هذه الدورة، وأحجام التصريف المصاحبة. وسنوضح أيضًا احتياطات المياه المتاحة، وسنتحدث بعد ذلك عن استخدام المياه بواسطة المجتمعات البشرية، والتطورات المحتملة للاحتياجات بالنسبة لطبيعة هذه المجتمعات (الإمداد بالماء الصالح للشرب، والزراعة، والصناعة). عندئذ سنذكر الصعوبات المحتملة لتلبية الاحتياج، والحلول الممكنة بالنسبة للاحتياجات والتكاليف.

الماء فوق الأرض

فوق الأرض توجد المياه التى نراها: المحيطات، والجليد فى القطبين، والبحيرات والأنهار، ثم السحب والمطر، وفى النهاية ما لا نراها إلا نادرًا: المياه الجوفية (الشكل ١).

ومخزن المياه الجوفية موجود فى صخور القشرة الأرضية، فى أعماق تختلف تبعًا للمناطق، وبكميات تقل تبعًا للعمق.

---

(١٥) نص المحاضرة رقم ٢٠٠ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٨ يوليو ٢٠٠٠.

المحيطات	١,٣٥ مليار كيلومتر مكعب، ٩٧,٤ في المائة من الإجمالي
الجليد	٢٧,٥ مليون كيلومتر مكعب، ١,٩٨ في المائة من الإجمالي
المياه الجوفية	٨,٢ مليون كيلومتر مكعب، ٠,٥٩ في المائة من الإجمالي
البحار الداخلية، البحيرات، الأنهار	٢٠٧٠٠٠ كيلومتر مكعب، ٠,٠١٥ في المائة من الإجمالي
رطوبة الأرض	٧٠٠٠٠ كيلومتر مكعب، ٠,٠٠٥ في المائة من الإجمالي
رطوبة الهواء	١٣ كيلومتر مكعب، ٠,٠٠١ في المائة من الإجمالي
مياه الخلايا الحية	١١٠٠ كيلومتر مكعب، ٠,٠٠١ في المائة من الإجمالي[١٦]

الشكل (١)

مخزون المياه كما تم تقديره بواسطة العلماء السوفييت.

وبشكل عام فإنها غزيرة في المائة متر الأولى، ثم تصبح نادرة جدًا بعد ١٠ كم. غير أنه من المحتمل بالإضافة إلى ذلك، في الكساء بين ٧٠ و ٢٩٠٠ كم في العمق، أن تحتوى صخور الصولانات المنصهرة جزئيًا التي يتكون منها الكساء، على قليل من الماء، بمقدار ٠,٣ في المائة من الوزن، ولكن نظرًا لحجم الكساء الأرضي، فإن هذه الكمية الصغيرة من الماء تمثل مع ذلك حجمًا كليًا بضخامة نظيره نفسها في المحيطات، وبذلك تُضاعف كمية الماء الموجود على الأرض. ونرى هذه المياه تظهر عند الانفجارات البركانية، على هيئة بخار. ومن المؤكد أن الكساء يُمد بالماء بواسطة الطرح،[١٧] عندما يتم جذب الصفائح المحيطية والقارية نحو داخل الكساء، وتجرف معها المياه الموجودة في تجاويف الصخور. غير أننا نتجاهلها إذا كانت ميزانية الكساء متعادلة، أي إذا كان التدفق المنطلق من البراكين يعوض تلك

(١٦)يوجد خطأ ما في حساب النسبة المئوية من إجمالي المخزون، حيث رطوبة الجو ١٣ كيلومتر مكعب ومياه الخلايا الحية ١١٠٠ كيلومتر مكعب والنسبة المئوية واحدة. (المترجم)

(١٧)الطرح subduction: تهدم القشرة المحيطية بتراكب حواف الصفحة القارية. (المترجم)

المكتسبة من الطرح. وهذا أمر مرجح؛ لأن الحجم الكلى للمحيطات لا يبدو أنه قد تغير بصورة تُذكر خلال الأزمنة الجيولوجية. غير أن مياه الكساء هذه صعبة المنال تمامًا فى الوقت الراهن، بواسطة التقنيات المتاحة. وتحت ٢٩٠٠ كم، حتى مركز الأرض، عند ٦٥٠٠ كم، فى نواة الحديد والنيكل، لابد أنه لا يوجد هناك ماء.

دورة المياه

فى هذا التصور الاستاتيكى لكميات المياه الموجودة على الأرض باستمرار، يجب إضافة تصور ديناميكى، ألا وهو تدفق الماء الذى يمثل ما يُطلق عليه "دورة المياه". ولقد تم البرهان، منذ القرن الثامن عشر، على أن دورة المياه تقوم على per ascensum؛ أى على التبخر على سطح الأرض، ثم الانتقال بالهواء عن طريق السحب، ثم السقوط على هيئة مطر. وكان القدماء يتصورون بالعكس، منذ العصر اليونانى القديم، دورة مياه per descensum، حيث كانت تخلو المحيطات من مياهها عن طريق القاع إلى القارات، حيث تتحلى المياه المذكورة عبر الأراضى، ثم تصعد حتى المصادر، بعملية ديناميكا حرارية غير واضحة تمامًا. وبهذه الطريقة كانوا يفسرون هذين التناقضين، أن مستوى البحار لا يرتفع على الرغم من المساهمة المستمرة بالمياه عن طريق الأنهار، وأن الأنهار المذكورة تستمر فى الجريان عندما لا تكون هناك أمطار. وحتى وهم يرون أن المطر مسئول عن الأعاصير والفيضانات، فإنهم أرجعوا وجود السحب إلى غضب زيوس، وليس بأى شكل كان إلى التبخر. وكان على كلود بيرو Claude Perrault وإدموند هالى Edmond Haley أن يبرهنا على واقعية دورة المياه التى تقوم على التبخر على سطح الأرض، الأول بالتدليل على أن الحجم السنوى لصرف السين فى مصبه أقل كثيرًا من الحجم الكلى للهواطل[١٨] فى حوضه الهيدروجرافى،[١٩]

---

(١٨) الهواطل precipitations: ما يهطل من مطر أو يلج أو برد. (المترجم)

(١٩) الهيدروجرافيا hydrographic: علم وصف المياه، مياه بلد أو قطر. (المترجم)

والثانى بأن مجموع تدفق الأنهار الواصل إلى البحر المتوسط أقــل مــن التــدفق المتبخر عن طريق هذا البحر، الذى قدّره انطلاقًا من قياسات أجريت على مراكب تجريبية فوق البحر. ولم تعد هناك حاجة فى هذه الحالة إلى استدعاء مجرى تحــت الأرض للبحر نحو الأرض لتفسير هذين التناقضين المذكورين (الشكل ٢)

التبخر	فى القارات فى المحيطات	٧١٠٠٠ كم٣/ سنة ٤١١٠٠٠ كم٣/ سنة
الهواطل	فى القارات فى المحيطات	١١١٠٠٠ كم٣/ سنة ٣٨٥٠٠٠ كم٣/ سنة

الشكل (٢)

تقدير للتدفق السنوى الذى يجوب دورة الماء التى تقوم على التبخر على سطح الأرض للكوكب فى مجمله.

وفى الموازنة الإجمالية، يجب القول فى هذه الحالة إن التبخر فى المحيطات يغذى الهواطل فى القارات: لا تغذى المحيطات إلا بنــسبة ٣٦ فــى المائــة مــن الهواطل القارية، والباقى يأتى من التبخر فى القارات نفسها، وفى الحقيقــة، فــإن جزءًا من المياه المتبخرة فى القارات يتساقط على هيئة مطر فى البحــر، والنــسبة المئوية للأمطار ذات الأصل المحيطى التى تصل إلى القارات تكون لذلك أكبر من الرقم المذكور، لكن النسبة المئوية الحقيقة غير معروفة بدقة. ومن المهم أن نلاحظ أن هذه القيم للتدفق السنوى، مقارنة بحجم بخار الماء الموجود عند كل لحظة فــى الجو (١٣٠٠٠ كم٣)، يتيح لنا القول بأن بخار الماء لا يمكث فى المتوسط إلا تسعة أيام فى الجو قبل أن يسقط على هيئة مطر أو ثلج: وتعتبر دورة المياه التى تقــوم على التبخر على سطح الأرض غير مستقرة إلى حد بعيد، وكل تغير لمعدل التبخر يُترجم بتغير مرافق لتواتر الهواطل. وتم التحقق من ذلك مثلاً فــى ١٨١٥، عنــد

الانفجار البركاني في تامبورا، في إندونيسيا، والذي أطلق حجمًا هائلاً من الغبار في الغلاف الجوي العلوي، الذي جعل السماء معتمة خلال عدة سنوات، وقلل في الوقت نفسه من التبخر في مجمل نصف الكرة الجنوبي. ومن الواضح تمامًا أن الإشعاع الشمسي يتيح طاقة التبخر، أي يتيح تغير طور الماء السائل إلى بخار ماء. ونفسر بالطريقة نفسها اندثار الديناصورات عند العصر الثالث الطباشيري Cretace - Tertiaire، منذ ٦٥ مليون سنة: وبسبب سقوط نيزك ضخم على الأرض، والذي أدى من جانب آخر في الوقت نفسه إلى انفجارات بركانية هائلة، وكان الغلاف الجوي مليئًا بالغبار وظل مظلمًا لعدة سنوات، مما أوقف دورة المياه وكذلك التخليق الضوئي، وقاد آكلات العشب والحيوانات الرئيسية ذات الأحجام الأكبر من الجرذ إلى المجاعة ثم الاندثار.

ولكن فالنتايع وصف دورة المياه. الجزء من التدفق المتاح للجريان في القارات هو الفرق بين الهواطل والتبخر، هو ٤٠٠٠٠ كم³/ سنة.

وهذا الرقم يتحلل إلى ثلاثة أبعاد:

- جريان فيضان في الأنهار عندما يسقط المطر، وهو ٢٧٠٠٠ كم³/ سنة.
- الجريان تحت الأرض للطبقات المائية، الذي يتم تفريغه في الأنهار أو أحيانًا مباشرة في البحر (وهو سبب أن الأنهار تواصل الجريان عندما لا يكون هناك مطر)، وهو ١٠٥٠٠ كم³/ سنة.
- المساهمة بالماء عن طريق ذوبان الجليد القطبي في المحيط عند خطوط العرض القطبية الشمالية والقطبية الجنوبية، هو ٢٥٠٠ كم³/ سنة.

ولا يجب إغفال أن هذه الأرقام شاملة بالنسبة للكوكب كله، وتجمع وظيفة الأنهار الكبيرة، مثل الأمازون، وبالمثل المناطق القاحلة أو شبه القاحلة مثل الساحل الإفريقي.

وتجاه هذه الأرقام من المثير إعطاء أرقام (مقدرة لعام ٢٠٠٠) لاستهلاك الماء بواسطة ستة مليارات نسمة الذين يسكنون الكوكب فى الوقت الراهن، بوحدة أرقام التدفق الطبيعى نفسها (الشكل ٣).

	الاقتطاعات	الاستهلاك
الزراعة للرى	٣٢٥٠ كم^{3}/ سنة	٢٥٨٠ كم^{3}/ سنة
التبخر فى مسطحات ماء السدود	٢٥٠ كم^{3}/ سنة	٢٥٠ كم^{3}/ سنة
الصناعة	١٢٨٠ كم^{3}/ سنة	١٩٠ كم^{3}/ سنة
الإمداد المنزلي	٦٦٠ كم^{3}/ سنة	٩٠ كم^{3}/ سنة
الإجمالى	٥٤٤٠ كم^{3}/ سنة	٣١١٠ كم^{3}/ سنة

الشكل (٣)

العمود الأول، الاقتطاعات، يمثل كمية الماء المستخرجة من الدورة الطبيعية بالأنشطة الإنسانية المختلفة، والثانى، الاستهلاك، الكمية المستخدمة بالفعل. ويعود الاختلاف بين هذين الرقمين إلى حقيقة أن الماء المقتطع، مثلاً للإمداد المنزلى، يتم فى الحقيقة وبالنسبة للجزء الأكبر منه رده بعد الاستخدام فى الوسط الطبيعى حيث ينضم إلى الدورة الطبيعية (الأنهار....)، لكن غالبًا بنوعية فاسدة بالنسبة للأنشطة الإنسانية، ويمكن معالجة هذا الماء وإعادة تدويره لاستخدامات أخرى، وهو يمر إلى حد ما بشكل طبيعى فى الأنهار، حيث تُطرح المياه المستخدمة فى مدينة ما غالبًا، المعالجة إلى حد ما، فى النهر، ثم يتم اقتطاعها من جديد لمدن غالبًا على منحدر النهر نفسه. وهذا ما يحدث غالبًا بالنسبة للماء الصناعى، الذى يخدم غالبًا فى التبريد أو الغسيل. والماء المتبخر هو الوحيد الذى يتم استهلاكه حقًا، أى يُفقد بالجزء الجارى فى الدورة. وهو يتعلق من الناحية الأساسية بالماء المستخدم فى الزراعة للرى، أو فى إجمالى عمليات الفقد بالتبخر فى بحيرات السدود.

وإذا قارنا هذه الأرقام بأرقام تدفقات الجريان المتاحة، نكتشف أنه من الناحية الإجمالية، بالنسبة للأرض كلها، فإنه يُقتطع من قبل أكثر من ٥٠ فى المائة من التدفقات المتاحة ما عدا الفيضانات (المقدرة بمقدار ١٠٥٠٠ كم^{3}/ سنة)، أو أكثر من ٣٠ فى المائة إذا لم نحسب سوى الاستهلاك. فإذا عرفنا أن الأنهار الرئيسية العالمية، مثل الأمازون، وسانت لوران، والكنغو تعتبر قليلة الاستخدام جدًا فى الحقيقة، فإننا ندرك الضغط الشديد الواقع بالتدريج على مصادر المياه، والذى قاد البلدان الأقل تنمية إلى اللجوء إلى جريان الفيضان، بإنشاء سدود لتخزين هذا الجريان، أو إلى مصادر مختلفة مثل تلك الخاصة بالمياه الحفرية (ليبيا مثلاً) أو بإزالة ملوحة مياه البحر (جزيرة مالطة، والمملكة العربية السعودية، والكويت...). ومن المفيد ملاحظة أنه منذ قرن، لم تكن الاقتطاعات الإجمالية تُقدر إلا بمقدار ٥٨٠ كم^{3}/ سنة، أى قريبة إلى حد ما من ١٠ فى المائة من الاقتطاعات الحالية. ومشكلة الماء هى مشكلة حديثة، ترتبط بشكل أساسى باحتياجات الرى للزراعة (٦٥ فى المائة من الاقتطاعات) فى محاولة لتلبية احتياجات إمداد عدد متنامٍ باستمرار للبشر.

مشاكل الماء فى القرن ٢١

لذلك فإن محاولة التنبؤ بالاحتياجات إلى الماء فى السنوات المقبلة، يتصل اتصالاً وثيقًا بتوقعات إحصاءات السكان، وبالمثل بتوقعات توزيع هؤلاء السكان على الكوكب، وخاصة إذا كان التزايد يحدث فى البلدان الغنية بالماء أو الفقيرة إلى الماء، أو إذا لم تؤدِ هجرات طوعية أو نتيجة مجاعات لن تكف عن الحدوث، إلى إعادة توازن لهذا التوزيع المكانى للسكان.

ولقد أنجزت الأمم المتحدة حديثًا توقعات للاحصاءات السكانية لسنة ٢٠٢٥ لكل بلد فى العالم، ووضعت افتراضًا أن هذا التعداد قد يظل ثابتًا ويبحث فى بلاده عن مصادر المياه الضرورية لتلبية الاحتياجات الإجمالية المعروفة. وتم تقدير

الاحتياجات الدنيا بقيمة ١٠٠٠ م٣ فى السنة ولكل فرد من السكان، مما يفضى فى الوقت الراهن إلى احتياج ٦٠٠٠ كم٣/ سنة للمليارات الستة من الكائنات الإنسانية التى نمثلها، وهى قيمة قريبة من ٥٤٤٠ كم٣/ سنة التى تم تقديرها للاقتطاعات الراهنة. وبالمعرفة التقريبية، لكل بلد، بالمصادر المتاحة، فإن هذا الحساب أفضى إلى نشر خريطة للعالم لعام ٢٠٢٥ (الشكل ٤)، حيث يرد فيها باللون الرمادى الشاحب البلدان التى يكون تحت تصرفها أقل من ١٠٠٠م٣/ سنة (شدة الماء water stress)، وبالرمادى الغامق أقل من ٥٠٠ م٣/ سنة (نقص الماء water scarcity).



الشكل (٤)
خريطة العالم لعام ٢٠٢٥ للبلدان التى
قد تضطر لأن تعانى من نقص فى الماء.

وهذه الخريطة مفيدة لأننا نكتشف أن الجزء الأكبر من البلدان التى تتأثر بشدة بالغة بنقصان الماء توجد فى الضفة الجنوبية للبحر الأبيض المتوسط، وفى الشرق الأوسط، وفى القرن الإفريقى، وأخيرًا فى إفريقيا الجنوبية. والبلدان الضخمة فى آسيا، مثل الهند أو الصين، أقل تأثرًا أو لا تتأثر بنقصان الماء، وقد يتطلب الأمر أن نضع فى اعتبارنا أن الحسابات تجرى بطريقة إجمالية لكل بلد: أحجام النقص المتوقعة مثلاً فى وسط الهند، قليلة الارتواء، يتم تعويضها فى هذا

الحساب بالمصادر القوية المتاحة فى شمال الهند، فى الأنهار الضخمة مثل الفانج Gange والإندس Indus، اللذان ينحدران من الهيمالايا. لذلك فإن هذه الخريطة تتضمن أنه ستتحقق تحولات ضخمة للماء لمساعدة المصادر التى لا تفى بالغرض وللوفاء بالاحتياجات فى قلب البلد نفسها، أو أيضًا تحولات سكانية داخل البلد، والذى لا يمكن تحقيقه قسرًا.

أمام هذا النقص المتوقع، يأتى فى البداية البحث عن حل تقنى: زيادة مصادر الماء. والوسائل المتوقعة متعددة: نقل الماء إلى مسافة كبيرة بالقنوات، أو حتى بالسفن، ربما من بلد إلى آخر، أو إنشاء سدود، أو تحلية مياه البحر، أو الاستعانة بمصادر جوفية أحفورية، إذا كانت موجودة، أو حتى استخدام جبال الجليد، التى قلنا عنها إنه يمكن سحبها من الدائرة القطبية حتى البلدان التى تعانى من العجز، وجعلها تذوب فى الشمس. وبشكل إجمالى، لا يمكن أبدًا إهمال الماء الجوفى. فإذا اتجهنا مثلاً إلى تحلية ماء البحر، فإن المصادر تعتبر لا حد لها فى الواقع. لكن المشكلة الرئيسية اقتصادية: أين يوجد المال لإنجاز هذه الأعمال الفرعونية، ولشراء بعد ذلك الماء المنتج بهذه الاستثمارات باهظة التكاليف؟ ويقترب سعر تحلية ماء البحر مثلاً من دولار لكل متر مكعب، ولا يمكن السماح بأى استثمار زراعى فى الوقت الراهن أن يُروى بطريقة مربحة بماء بهذا السعر، من منظور الأسعار العالمية للمواد الغذائية. ولكن قد تفعل السعودية ذلك، فالطاقة لديها رخيصة جدًا، ، أو يتغلب الاهتمام بالاستقلال الغذائى على الاعتبارات الاقتصادية، فى بلدان ذات مصادر مالية ضخمة.

واستقرت بالتدريج فكرة أن عمليات النقل الضخمة للماء ربما لا تكون اقتصادية، وأنه قد يكون من الأفضل نقل المنتجات الزراعية المنتجة بالماء بدلاً من نقل الماء نفسه. كذلك مثلاً يحتاج الأمر إلى ١٠٠٠ طن من الماء لإنتاج طن من القمح: لو أنه من الممكن إنتاج القمح فى بلدان لديها رى طبيعى جيد ونقلها إلى بلدان لديها عجز فى الماء، ستكون التكلفة الإجمالية أكثر انخفاضًا من نقل الماء ثم

إنتاج القمح فى بلدان لديها عجز فى الماء. ويطلق على عمليات النقل هذه "الماء الافتراضى"....! وأيضًا قد يكون من الواجب وجود إمكانية إنتاج فوائض فى البلدان ذات الرى الجيد، ويضاف إلى ذلك أن تشهد البلدان ذات العجز فى الماء نشاطًا مربحًا غير زراعى، يتيح لها التحرر من النقد الأجنبى الضرورى لشراء المواد الغذائية التى لا يمكنها إنتاجها. وفى هذه الحالة نعود إلى المشكلة الأولية المتعلقة بالمصادر المالية وبالتطور الاقتصادى. وتبقى فى النهاية مشكلة التبعية السياسية المرتبطة بالتبعية الغذائية.

مؤتمر لاهاى العالمى للمياه
فى مارس ٢٠٠٠

فى مارس ٢٠٠٠ عُقد اجتماع ثانٍ ضخم حول المياه فى لاهاى، حضره ٤٥٠٠ مشارك، اختتم بمؤتمر وزارى جمع بين ممثلين لأكثر من ستين بلدًا. وتم إعداد هذا الحدث بعناية بواسطة المجلس العالمي للمياه، وهو منظمة مستقلة، لكنها مدعومة بقوة من البنك الدولى ومن مجمل وكالات الأمم المتحدة، وخاصة اليونسكو. وكان هذا المجلس العالمى قد أسس، بالاتفاق مع عدد كبير جدًا من المنظمات، من المنظمات غير الحكومية ومن الدول، المتطورة أو النامية، "الرؤية العالمية للماء La Vision mondial de Leau"، يُعتبر ممثلاً لإجماع عالمى حول طبيعة المشكلة، وحول الحلول المقدمة لها. وهذه الرؤية العالمية للماء كان لها الفضل فى تصور ثلاثة سيناريوهات، تمتد حتى سنة ٢٠٢٥:

– الأعمال كما هى العادة، أى اتباع السياسة الراهنة بدون تغير شىء. يتم ببساطة استكمال التطورات الكمية والنوعية الراهنة. عندئذ تكون الأزمة على موعد.

– التقنية والاقتصاد والقطاع الخاص: ويتعلق الأمر إجمالاً بتخصيص مجال الماء، وتثبيت السعر التجارى للماء، بالاهتمام بالاقتدار والعدالة. وفى هذا الأمر

تعتبر عولمة الاقتصاد هى القاعدة، لكن هذا السيناريو يطرح جانبًا البلدان الأكثر فقرًا ولا يحمي البيئة. وهذا سيناريو واقعي، لكن يصعب تحمله.

– القيم وأساليب الحياة: هذا سيناريو الأمل. التعليم، والفعل على المستوى المحلى، والتطور الدائم، والشفافية، والعدالة، والتضامن، واحترام البيئة، والابتكار التقنى، والمهارة، والمنظمات الدولية والمؤسسات الوطنية المعاد تقويمها والفعالة، كل ذلك مطلوب فى هذا المجال. هذا هو السيناريو المفضل. كل شىء سيصبح جيدًا، إذا احتشد المجتمع الدولى حوله، ودفع الثمن الضرورى للترتيبات الواجبة لإمداد الجميع بالماء.

وإنه لأمر صعب بالطبع فك رموز كل هذا وفهمه لتصور وجهة نظر واقعية حول مشكلة الماء فى القرن ٢١. فلنجرب مع ذلك استخلاص بضع أفكار بسيطة، بضعة رهانات، بضعة آراء لنتأمل إلى أين نتوجه.

وليس السبب الأول فى مشكلة المياه نقص المياه، لكنه التكاثر الديموجرافى. ويبدو أنه يتباطأ، ويقدر الخبراء أن التعداد السكانى العالمى قد يستقر نحو ٢٠٥٠ عندما يصل من ٨ إلى ١٠ مليارات نسمة. لكن هذا النمو غير منتظم: وهو يحدث من الناحية الأساسية فى البلدان النامية حيث وُجدت من قبل ضائقة مائية. لذلك فإن المشكلة ليست فى الواقع نقصًا فى المياه على المستوى العالمى، لكنها توزيع طبيعى غير ملائم للمصدر بالنسبة إلى تمركز التكاثر الديمجرافى. ونضيف فى النهاية أن البلدان المعنية لها، إزاء الماء، مواقف مختلفة جدًا. لذلك لا يمكن لمشكلة الماء أن تنفصل عن المشاكل الاجتماعية.

إن التنظيم الطبيعى للتوازن السكانى للكائنات الحية، أيًا كان، يحدث دائمًا حتى الآن بواسطة آليات تنافس أو بحصر الموارد. وليس من السهل فى الوقت الراهن الحديث حول ما سيوقف النمو الديمجرافى للإنسان المعاصر homo sapiens، الذى ليس له منافس، بطريقة دائمة. وهذا الحصر للنمو يمكن أن يكون طوعيًا (تحديد النسل)، أو طارئًا (يبدو أن لدينا أمل فى أن الإقلال من عدد

المواليد، الذى يصاحب التقدم الاقتصادى، سوف يوقف النمو قبل أن تتكفل به العوامل الفيزيائية)، أو طبيعيًا (الحصر بواسطة الموارد). ومن الواضح فى الوقت الحالى أن الماء سيصبح العامل الفيزيائى الأول المحدود الذى سيدخل فى المعركة، بانحراف إنتاج الأغذية. لذلك فإن أزمة الماء متوقعة، ولو حملت لها التقنية حلاً، بدون الحد من النمو الديمجرافى، سوف يتدخل عامل حصر طبيعى آخر إن آجلاً أو عاجلاً. وكل السيناريوهات المتوقعة للتعامل مع مشكلة الماء اعتبرت حتى الآن أن النمو الديموجرافى قد يحافظ على الإحصاءات السكانية فى وضعها. وقد يحدث فى الحقيقة ثلاثة أشياء:

- علاج نقص الماء "باستحداث"، فى البلدان التى تعانى من هذا النقص، بالتقنية، الماء الضرورى للاحتياجات (عمليات النقل عبر مسافة طويلة، تحلية مياه البحر، عمليات إعادة التدوير واقتصاديات متنوعة، تطوير ثقافات أكثر تكيفًا مع الجفاف..إلخ)، وليس عامل الحصر هو الماء، فهناك ما يكفى من الموارد القابلة للتجديد على المستوى العالمى، إنه المال اللازم لاستخدام التقية الذى قد يمثل خللاً، حيث إن العجز المائى والنمو الديمجرافى يتراكبان غالبًا مع خريطة الفقر. ويمكن أيضًا نقل مواد غذائية.

- الزيادات فى النمو الديمجرافى ينجم عنها هجرات ضخمة. وهذا هو ما حدث غالبًا فى تاريخ البشرية، عندما تم الوصول إلى الحدود الفيزيائية للنمو، الذى رأيناه فى مجاعات أيرلندا فى بداية القرن العشرين، وفى إسكندنافيا فى القرن التاسع عشر، والذى غذى الهجرة إلى الأمريكتين. ومن وجهة نظر المناطق "المتاحة" فإن حوض الأمازون، مثلاً، يعتبر بالفعل بكرًا. وقد يكون من الممكن من الناحية الطبيعية استعماره، باستصلاح الغابة، وبتنظيم استغلال الأنهار. وقد يكلف ذلك أيضًا الكثير إلى حد بعيد: كيف يمكن استقبال وإعاشة، فى هذه الأراضى الجديدة، المائة مليون نسمة، الذين يجب إحضارهم، فى كل سنة، طوعيًا للهجرة إليه؟ ومع ذلك فإن هذه المنطقة من العالم تعتبر غالبًا الاحتياطى النهائى للكوكب، "رئة" الأرض، ملاذ التنوع الحيوى. فهل يجب التضحية به من أجل النمو

الديمجرافى؟ وهناك مناطق أخرى قليلة السكان: أستراليا، وكندا، والولايات المتحدة، وحوض الكونغو فى إفريقيا، وحتى فى بعض أجزاء أوروبا. فهل المناطق المعنية مستعدة لفتح أبوابها لعدد ١٠٠ مليون نسمة سنويًا؟

– قد يشهد العنف أشكالاً مختلفة، بداية من القحط المستوطن أو الكارثى فى سنوات الجفاف، إلى الأوبئة الشديدة، التى تصبح آلية مأساوية للحد من النمو الديموجرافى. ويصاحب ذلك فى الواقع نمو مفرط فى المدن العملاقة. وهناك فى الوقت الراهن ٢١ مدينة يتجاوز سكان كل منها عشرة ملايين نسمة (١٧ منها فى البلدان النامية)، مقابل ٣ فى ١٩٥٠. وسوف يكون هناك أكثر من ٥٠ فى ٢٠٢٥. والحالة الصحية لمدينة من هذه المدن الضخمة تكون مفزعة أحيانًا، والسلطات المتخاذلة غالبًا فى تنظيم المدينة، خوفًا من أن يتسارع النمو أيضًا أو لا يكون لديها الموارد لإنجاز ذلك. وقد تساعد تلك التكتلات الضخمة على تفريخ ونقل أمراض جديدة. وقد يكون العنف أكثر مباشرة: الحروب، والصراعات حول الماء، بالنسبة للبلدان المطالبة بتقاسم الموارد (مثال لذلك تركيا والشرق الأوسط بالنسبة لدجلة والفرات، ومصادر المياه النابعة من الهيمالايا بالنسبة للهند وباكستان وبنجلاديش...). ويُخشى أيضًا من الحروب الأهلية بين الجماعات العِرقية للاستيلاء على الموارد.

ومن هذه السيناريوهات الثلاثة اختارت الرؤية العالمية للمياه السيناريو الأول، أى المساعدة الدولية الاقتصادية، دون نقل السكان. وهو بالتأكيد الأقل عنفًا، وهو يتفق أيضًا مع الأخلاق التى تحث الفعاليات فى أصل "الرؤية": مدخل أنجلو – ساكسونى، مطبوع بالبروتيستانتية، وبالمشاعر الطيبة ولكن أيضًا بالمركنتيلية.[٢٠] ولم يرد شىء عن النمو الديمجرافى، الموضوع المحظور بالنسبة للجميع، وتم الاكتفاء بإثبات أنه الاقتصاد، التجارة، هو الذى سيحل كل المشاكل. وعلى هذا

(٢٠) المركنتيلية mercantilisme: نظام اقتصادى نشأ فى أوروبا خلال تفسخ الاقطاعية لتعزيز ثروة الدولة عن طريق تنهيج الزراعة والصناعية واعتبار المعادن الثمينة ثروة الدولة الأساسية. (المترجم)

قدّرت "الرؤية" تكاليف الحل الاقتصادى لمشاكل الماء بالأرقام: قد يحتاج الأمر إلى توظيف مقدار من المال يصل كل سنة، فى العالم، إلى ١٦٠ مليار دولار أمريكى خلال عشر سنوات للقضاء على مشاكل الماء. وتم إثبات أن مشكلة الماء مشكلة اقتصادية، وليست مشكلة واقعية فى الموارد. ويبدو فى الوقت الراهن أن النصف فقط من هذا المبلغ تم إنفاقه سنويًا من أجل الماء. من أين يتم الحصول على مبلغ ٨٠ مليار دولار الباقية؟ تشيد "الرؤية" بخصخصة سوق الماء: الدفع مقابل الماء، وترك التوظيف الخاص لإنجاز الأعمال الضرورية، مع جعل سداد الاستثمارات على المستعملين. والإدارة الخاصة للماء يعتبرها البعض أكثر اقتصادًا، وأكثر فعالية من الإدارة العامة. ويقلل الدفع مقابل الماء من أوجه الإسراف، مع دعم البحث عن طرائق مبتكرة، للرى مثلاً. لكنه يتعارض مع أخلاق الكثير من الحضارات، وخاصة فى البلدان الإسلامية، التى تعتبر الماء ثروة مجانية. ويضاف إلى ذلك أنه لن يتم الدفع مقابل الماء ولكن فقط مقابل خدمات النقل، والتنقية، حيث سيتم تسجيله فى "صك اجتماعى للماء" حيث يكون "توصيل الماء للجميع يجب أن يكون حقًا لا يسقط بمرور الزمن"، وأن الحد الأدنى للمعيشة يجب أن يتم توزيعه مجانًا. ولكن للمدخل التجارى حدوده، ولن تكون البلدان الأكثر فقرًا قادرة أبدًا على تهيئة سوق جاذب من الناحية الاقتصادية. عندئذ تقترح "الرؤية" أن يأخذ التضامن الدولى على عاتقه هذه الاحتياجات غير المدفوعة، والتى تصل إلى مبلغ ١٢ مليار دولار أمريكى سنويًا. ومن الواضح أن هذا مبلغ ضخم، ويبيّن أن المؤتمر الوزارى الذى أغلق باب المناقشة يُحجم عن كل الالتزامات، مع إعطاء عناية كبيرة باستبعاد كل بند مُلزم، فى حين أن أغلب الدول المتطورة تشهد فى الوقت الحاضر زيادات فى الميزانيات. وبناء عليه نصل إلى استنتاج أن، وهذا أمر بديهى حقًا، الانحياز اعتمد على انخفاض النمو الديموجرافى، سواء طوعيًا أو سواء بالخضوع للواقع عن طريق طيف العنف الذى تحدثنا عنه، لحسم مشكلة الماء.

وفوق هذا التعتيم المستقبلى يجب إضافة تأثيرات (بعض منها، لكن من الصعب التنبؤ بها) التغيرات المناخية الناشئة عن ظاهرة الاحتباس الحرارى.

وعلى وجه الإجمال ليس من المتوقع أن تتغير الهواطل العالمية كثيرًا، لكن توزيعها فى المكان سوف يتغير، وإنها للأسف لمشكلة أن بلدان الجنوب المفتقرة الآن للماء ستصبح أكثر افتقارًا إليه أيضًا، وبالعكس بالنسبة للبلدان جيدة الارتواء، وسوف يكون الحد الفاصل بين المنطقتين على خط عرض ليون تقريبًا، مع عدم يقينية بالغة مع ذلك.

ولن يظل الزمن للأسف فى صالح البيئة. وسبق، فى لا هاى، فى مارس ٢٠٠٠، أن ظهرت صراعات بين البلدان النامية وجمعيات حماية الطبيعة، التى تعارض إنشاء السدود، المشتبه فى ميلها كذلك إلى خدمة مصالح تجارية لمنتجى الحبوب، عند تنظيم الاحتياجات. وستكون كل السبل جيدة للإنتاج، وسيزداد إنشاء السدود الضخمة (هذا واضح مثلاً فى الأخاديد الثلاثة Trois Gorges فى الصين)، وسوف يعم استخدام المخصبات والمبيدات الكيميائية. وربما سيكون على الأرض أن تغذى من ٨ إلى ١٠ مليار نسمة، لكن المحافظة على البيئة ستنسحب إلى الخلفية...

مراجع:

– Marsily (G. de), *L'Eau*, Paris, Flammarion, Collection Dominos, 2e édition, 2000.
– Meybeck (M.), Marsily (G. de) et Fustec (E.), *La Seine en son bassin*, Paris, Elsevier, 1998.
– Roche (P.A.), *La Vision pour l'eau en 2025 : s'est-il passé quelque chose à La Haye ?*, Paris, Agence de l'Eau Seine Normandie, 2000.
– Teniere-Buchot (P.F.) (coordonateur), *L'Eau au XXIe siècle*, Paris, Éditions Futuribles, 2000.

رصد المحيط[21]

بقلم: كريستيان لو بروفوست

Christian Le PROVOST

ترجمة: عزت عامر

من أجل لفت الانتباه إلى الدور الأساسي للمحيط فى التوازنات المناخية والبيئية الكبرى لكوكبنا، تكفى بضعة أرقام. يحتل المحيط ٧٥ فى المائة من سطح الأرض، ويحتوى على ٩٦ فى المائة من مياهها، أى ١,٤ مليار كيلومتر مكعب. وهذه الكتلة الهائلة من الماء لها القدرة على تخزين جزءًا مهمًا من الحرارة الشمسية التى تستقبلها الأرض. وتنقل التيارات المحيطة هذه الحرارة من خط الاستواء إلى القطبين. ويلعب المحيط كذلك دور منظم حرارة عملاق بالنسبة لكوكبنا. وهو ينقل كمية من الحرارة مثله مثل الغلاف الجوى، ولكن على مستويات زمنية أطول بكثير جدًا. ففى حين أن "الطقس" يتغير فى الغلاف الجوى فى بضعة أيام، فإن التغيرات فى المحيط تكون أكثر بطءًا بكثير: تكون فى عدة سنوات بالكسور العشرية للمحيط السطحي (الألف متر الأولى)، وفى قرون بالكسور الألفية بالنسبة للمحيط العميق.

ومع ذلك، فإن معرفتنا بهذا المحيط مازالت قليلة. وبالنسبة لهذه البيئة الهائلة، والغامضة من الجانب الأساسي، والتى يصعب اختراقها، ومن ثم فهى معادية حتمًا، كان لدى البشر خوف منها منذ زمن طويل، لكن فتنتها لم تتوقف. والمحيط الذى كان فى الماضى مصدرًا للأساطير، جعل يفشى أسراره بالتدريج، لكنه مازال بيئة معقدة لم يبدأ الرصد العلمى له فى الواقع إلا فى ١٨٧٢ بواسطة البعثات الأكثر شهرة فى مجال علم المحيطات: السفينة البريطانية شالنجر Challenger التى أبحرت حينئذ فى بعثة استغرقت أربع سنوات وأجرت مئات من

(٢١) نص المحاضرة رقم ٢٠١ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٩ يوليو ٢٠٠٠.

عمليات سبر الأغوار، وتسجيل درجة حرارة الماء على أعماق مختلفة، وأخذت عينات من تربة ما تحت الماء.

بعض خواص أساسية للمحيط

نعرف في الوقت الراهن كيف نرصد هذا المحيط بشكل أكثر سهولة، وسنعرف كيف يحدث ذلك فيما يلي. لكننا سنصف أولاً باختصار هذه البيئة غير المتجانسة إلى حد بعيد.

يتم تجميع ثلثي حرارة الإشعاع الصادر من الشمس على كوكبنا بواسطة البحر. ومن ثم فمن المنطقي أن المحيط يكون متعدد الطبقات من ناحية الحرارة، بمياه دافئة على السطح، قد تصل إلى أكثر من ٢٥ درجة مئوية في المناطق خط الاستواء ومياه باردة، تقترب من أقل من ٤ درجات مئوية في أعماقه (ما تحت ٨٠٠ إلى ١٠٠٠ متر). وهو أيضًا متعدد الطبقات في الملوحة بالنسبة لأصل كتل الماء التي يتكون منها المحيط، ومن ثم متعدد طبقات الكثافة، بوجود مياه أكثر خفة على السطح ومياه أكثر كثافة في الطبقات العميقة. وهذا التعدد في الطبقات يتغير مع خط العرض: فالمياه تكون دافئة ومالحة في المناطق الاستوائية، وأكثر برودة لكنها أكثر حلاوة وهي قادمة من القطبين. والخاصيتان، وهما درجة حرارة وملوحة كتل الماء، هما اللتان تتيحان تحديد مصدريهما: وهكذا يتم تمييز مياه أصلها البحر الأبيض المتوسط، والتي يمكن متابعتها بعيدًا في المحيط الأطلنطي بين ١٠٠٠ و ٢٠٠٠ متر، وهي مياه يطلق عليها "أعماق شمال الأطلنطي" تتكون في بحر النرويج وبحر لبرادور[٢٢] والذي يجري ببطء تحت مياه سطح ذات أصل استوائي نقلها تيار الخليج[٢٣] ومياه من المنطقة القطبية الجنوبية، تكونت في التيار

---

(٢٢)بحر لبرادور mur du Labrador: لبرادور شبه جزيرة كندية على الأطلنطي بين خليج هدسون وخليج سانت لورانس يسير بجانبها تيار لبرادور البارد. (المترجم)

(٢٣)تيار الخليج Gulf Stream: تيار دافئ في شمال المحيط الأطلنطي من شرق أمريكا الشمالية. (المترجم)

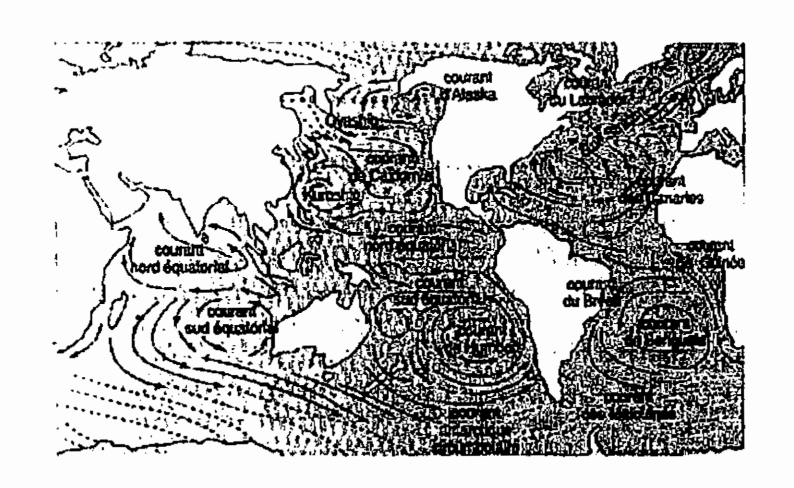
المحيط بالقطب الجنوبى، الذى نفذ إلى المحيطات الثلاثة (الأطلنطى والهندى والهادى) تحت مياه السطح الاستوائى، والذى وُجد فى عمق الأطلنطى الشمالى والهادى الشمالى.

والمحيط يكون فى حالة حركة. وتجوب فيه تيارات ذات مدى واسع وذات خصائص زمنية مختلفة جدًا. والتيارات الناتجة عن عمليات مد وجزر وعن موجات عاصفة تكون شديدة على الصفائح القارية ومسيطرة فى المناطق الساحلية ذات فترات زمنية مميزة تتراوح بين بضع ساعات (١٢ و ٢٤ ساعة بالنسبة للمد والجزر) إلى بضعة أيام. وتدفع التيارات المحيطية الضخمة مثل تيار الخليج (الشكل ١) طبقات الماء العليا للمحيط (الـ ٨٠٠ إلى ١٠٠٠ متر الأولى)، خاصة تحت تأثير الرياح، على مستويات زمنية خاصة تصل إلى بضع سنوات (يلزم نحو تسع سنوات لكى تكمل كتلة ماء سطحى دورة فى المحيط الأطلنطى الشمالى). وتكوّن الدورانات العميقة، تحت طبقة التدرج الحرارى الأقصى[٢٤] الأساسية (٨٠٠ إلى ١٠٠٠ متر) الدوران "الملحى الحرارى[٢٥]". وهذا الدوران مدفوع أساسًا، كما يشير وصفه، بواسطة اختلافات الكثافة بين كتل الماء، الناتج بشكل خاص فى مناطق التبادلات الديناميكية الحرارية الضخمة مع الجو عند خطوط العرض المرتفعة (بحر النرويج، بحر لبرادور، ومناطق القطب الجنوبى)، ولكن أيضًا فى مناطق خاصة مثل خليج ليون Golfe du Lion فى البحر الأبيض المتوسط. وهذه الدورانات بطيئة جدًا: وتكوّن الأنشوطة البطيئة للدوران المحيطى، غير المعروفة بشكل جيد، ولكنها على مستوى زمنى ألفى (الشكل ٢).

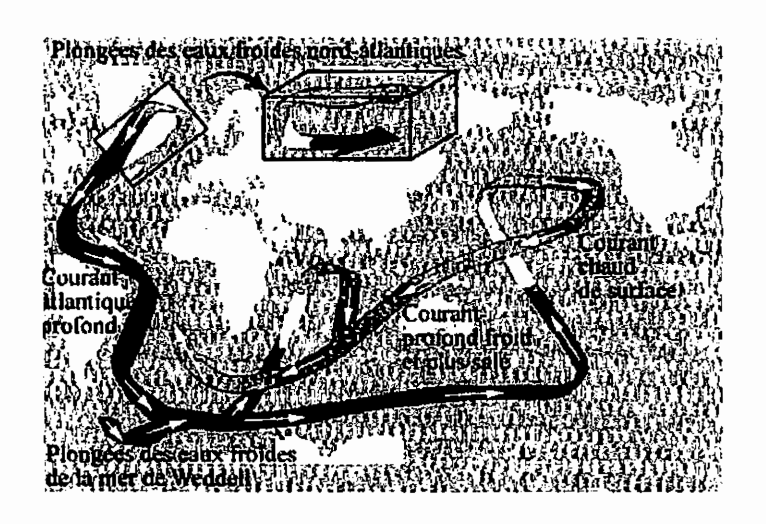
---

(٢٤) طبقة التدرج الحرارى thermocline: طبقة على عمق يتراوح بين ١ إلى ٢ كيلومترات فى مياه البحار. (المترجم)

(٢٥) الملحى الحرارى thermohaline: دوران الماء الغورى (فى البحار) بفعل تغيرات الملوحة ودرجة الحرارة. (المترجم)



الشكل (١)
المنظومات الضخمة للتيارات
فى الطبقات السطحية للمحيط



الشكل (٢)
الأنشوطة البطيئة للدوران العام
لكتل الماء المحيطية، التى يطلق عليها الدوران الملحى الحرارى.

السياق الدولى لعلم المحيطات الحديث

برز علم المحيطات الفيزيائى خلال العامين ١٩٨٠ و١٩٩٠ بإنجاز برامج دولية ضخمة لرصد المحيط، تحت رعاية البرنامج العالمى لأبحاث المناخ WRCP. وتم تكريس برنامج المحيط الاستوائى والجو العالمى TOGA لرصد ودراسة التفاعل بين المحيط والغلاف الجوى فى المناطق الاستوائية (المحيط الهادى، والهندى والأطلنطى). واستنفر برنامج تجربة دوران المحيط العالمى WOCE الأسرة الدولية لعلماء المحيطات للرصد المنهجى للمحيط الدولى بهدف اكتساب معرفة للمرة الأولى إجمالية حقًا بالمحيط: درجة حرارة وملوحة كتل الماء المحيطية، وسرعة التيارات، السطحية والعميقة، فى المناطق الاستوائية والقطبية. وأتاحت هذه البرامج استخدام وسائل رصد فى موضعها الأصلى in situ على مقياس لم يتم الوصول إليه من قبل، ويغطى للمرة الأولى كل المحيطات فى الوقت نفسه. ومواكبة لهذا الجهد بدون التقدم على الرصد فى الموقع الأصلى، جلبت تقنيات الكشف الفضائى عن بعد رؤية تفصيلية عن المحيط السطحى وعن التغيرات الزمنية بدقة وبحل ثورى. وبشكل متواز، برز فى تلك الفترة، بمساعدة النمو الأسى لقوة الحساب والتخزين لأجهزة الكمبيوتر، تطورات مهمة فى عمل نماذج للديناميكا والديناميكا الحرارية للمحيط وفى تطور تقنيات لتعاكس أو تماثل الأرصاد، وهى طرائق تتيح إنشاء صورة مستمرة للمحيط فى أبعاده الأربعة (الأفقى، والرأسى، والزمنى – فى فترة الرصد والتحليل).

وسوف تظهر هذه الأنظمة، علم المحيطات الفيزيائى، خلال العقد القادم بالانتقال من مرحلة الرصد الاستكشافى السابق نحو مرحلة الرصد بعيد المدى ونحو ترتيب علم المحيط العملياتى (فى الصورة الراهنة للرصد والتنبؤ الجوى من أجل علوم الغلاف الجوى). وتمت تهيئة برنامجين: قابلية التبدل المناخى CLIVAR ومنظومة رصد المحيط العالمية GOOS.

وهدف برنامج CLIVAR دراسة قابلية التبدل المناخى بتكرارات دولية (نموذجيًا ظاهرة النينو الشهيرة)، والعقدية (مثل تقلب شمال الأطلنطى NAO)

والأخرى متعددة العقدية والقرنية (مثل التطور بعيد المدى لمستوى البحر). وتختص هذه الدراسات بتحسين التنبؤات الفصلية بقدر ما تهتم بتطور المناخ وتطور تأثير الاضطرابات المرتبطة بالبشر المحتملة أو الحقيقية على بيئتنا.

وينظم برنامج منظومة رصد المحيط العالمية نظامًا دائمًا ولزمن طويل لرصد للمحيط، ويغطى كل البارامترات التى تصف المحيط أو تتحكم فيه، فيزياء المحيط وديناميكيته الحرارية وتركيبه الكيميائى الحيوى. وهو يلبى الاحتياجات على المدى البعيد لبرنامج قابلية التبدل المناخى. لكنه يلبى أيضًا الاحتياجات الأكثر إلحاحًا للحاجة الاجتماعية لتقييم أفضل لأثر استثمار الإنسان للبيئة البحرية: طاقتها، ومواردها المعدنية ومواردها فى مجال صيد الأسماك، والتهيئة الساحلية، والاستثمار السياحى... إلخ.

ويجب على برنامج GOOS أن يساعد على انتقال برامج رصد المحيط بطريقة علمية (أى استكشافيه) إلى طريقة عملياتية (دائمة وفى المدى البعيد). وعندما تنقل شبكات الرصد العالمية أرصادها فى الوقت الفعلى، سوف يتم استغلال المعطيات المكتسبة فورًا: منظومات مدمجة توفق بين نماذج رياضية ونماذج محاكاة تتيح الإنتاج المنتظم لصورة عن حالة المحيط فى أبعاده الثلاثة، بوتيرة ستتغير من بضعة أيام إلى أسبوع أو أسبوعين أو شهر، تبعًا لقطاع التطبيق.

وسائل الرصد

برنامج الأقمار الصناعية

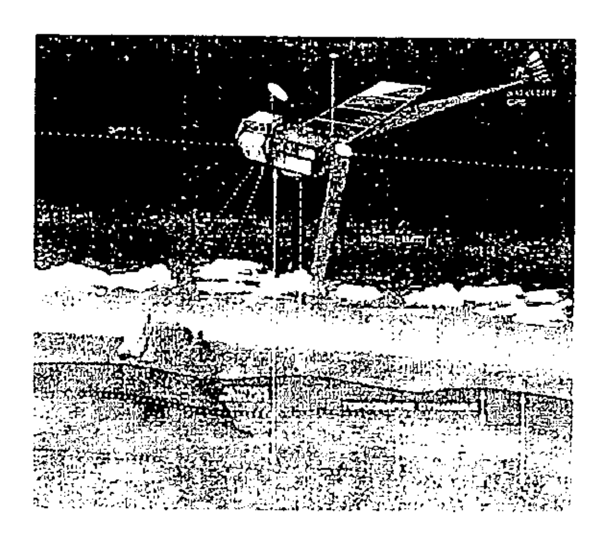
سبق التخطيط لبرامج الكشف الفضائى عن بعد للسنوات العشر القادمة، وهى فى طريقها لأن تكتمل.

ولقد فرضت عملية قياس الارتفاعات بالأقمار الصناعية نفسها (مع البعثتين الفرنسية الأمريكية TOPEX/POSEIDON والأوروبية ERS) كتقنية قوية

وثورية لرصد المحيط. والترتيب كما يلى (شكل ٣): حلق القمر الصناعى حول الأرض، وعلى متنه رادار يقيس المسافة "الارتفاعات" بينه وبين سطح المحيط. وتم تحديد ارتفاع القمر الصناعى بمساعدة شبكة من النصب المضيئة موزعة على سطح الأرض: منظومة DORIS. وتم استنتاج ارتفاع البحر من هذين الرصدين بدقة تصل إلى بضعة سنتيمترات. ويتيح قياس الارتفاعات بالأقمار الصناعية الحصول كل ١٠ إلى ٣٥ يومًا على رؤية شبه إجمالية لطبوغرافيا سطح المحيط، مسجل فيها أغلب سمات تحركات المحيط السطحى وأيضًا المحيط العميق: عمليات المد والجزر الخاصة به، وردود فعله تجاه المؤثرات الجوية، مكونات طبقاته تبعًا لحركة الأرض،[٢٦] الموجات الاستوائية والكوكبية، تغيرات المحتوى الحرارى... إلخ. وبدأ أخيرًا تشغيل القمرين TOPEX/POSEIDON و ERS لكن المنظومة مازالت متوقعة مع برامج JASON - 1 (البعثة الفرنسية الأمريكية - CNES NASA) و INVISAT (بعثة لوكالة الفضاء الأوروبية)، ثم JASON - 2، وبعثات أخرى التى سوف تنفذ أجيالاً جديدة من مقاييس الارتفاع مثل ALTIKA، وهو مشروع فرنسى قيد الدراسة. وكما لاحظنا فإنه من الضرورى فى الحقيقة المحافظة على وأيضًا تحسين أداءات منظومات الرصد هذه على المدى البعيد، لفهم تطور مناخنا ومتابعة تطور بيئتنا.

---

(٢٦) المتعلق بحركة الأرض geostrophique: متعلق بالقوة التى تسببها الأرض عند دورانها أو متعلق بحركة الأرض. (المترجم)



الشكل (٣)
TOPEX/POSEIDON

وسوف تتابع بعثات كشف أخرى عن بعد ضمان قياس البارامترات الأخرى الخاصة بالمحيط السطحى: درجة حرارة السطح، لون الماء (فى الواقع تركيز العوالق النباتية[٢٧] لكتل الماء السطحى)، الرياح على سطح البحر، تميزات حالات البحر.. إلخ. وهناك تقنيات جديدة فى الكشف عن بعد تحت الدراسة لرصد بارامتر ملوحة سطح البحر (بعثة SMOS)، وهو كما نذكر مهم جدًا حيث إنه يتيح مع درجة الحرارة تحديد كثافة كتل الماء المحيطية التى تمتزج فى التيارات الضخمة المحيطية. وسوف تتيح بعثتان جديدتان التحديد بدقة أكبر وبمزيد من التفاصيل مجال الجاذبية (GRACE, GOCE) ومعرفتنا بهما ليست كافية فى الوقت الراهن، لتحديد المكوّن الدائم للدوران العام المحيطى انطلاقًا من معطيات قياس الارتفاعات بالأقمار الصناعية: كثافة تيار الخليج فى الأطلنطى، ونظيره فى المحيط الهادى، وكيرو شيفو Kuro Shivo، التيار المحيط بالقطب الجنوبى... إلخ. (شكل ١).

---

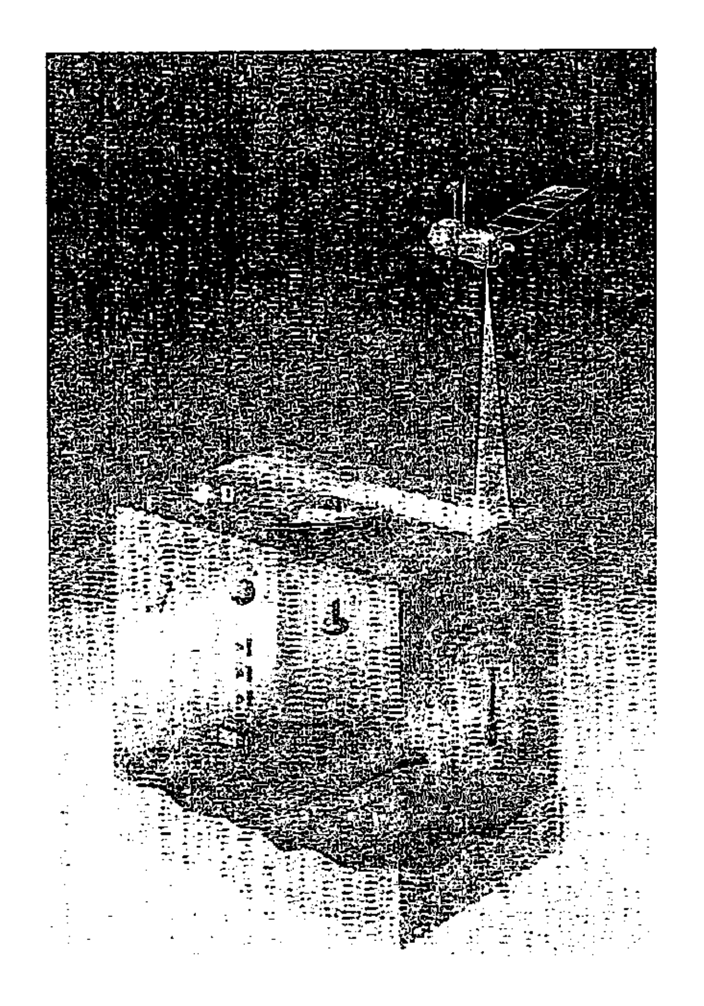
(٢٧) العوالق النباتية phytoplancton: عوالق نباتية مائية صغيرة الحجم جدًا وتشكل جزءًا كبيرًا من غذاء الحيوانات المائية. (المترجم)

والمفارقة أن هذه الأرصاد الحاذقة بالأقمار الصناعية لا تعطينا معلومات سوى عن حالة المحيط السطحى. ومن أجل الحصول على معرفة بما يدور فى داخل المحيطات، من الضرورى أن نتتبع بشكل أكثر كلاسيكية الأرصاد فى الموضع الأصلى in situ، انطلاقًا من مبانى خاصة بعلم المحيطات، ومحطات مستقلة ثابتة (مثَبّتة بالقاع بمساعدة مراسى) أو مجارى محولّة حسب التيارات (الشكل ٤). ومن المبرمج فى إطار البرنامج CLIVAR إنجاز، خلال فترات زمنية منتظمة تصل إلى بضع سنوات، أفرع كلاسيكية خاصة بعلم المياه عبر المحيطات انطلاقًا من سفن خاصة بعلم المحيطات حتى يمكن "مراقبة" التطور البطئ لكتل الماء المحيطية، وستتضمن تلك الأفرع بشكل خاص قياسات مواد تتبع (أكسجين، هليوم، تريتيوم، كربون ١٤، ..إلخ)، تتيح قياس التركيب البطئ (الملحى الحرارى) للدوران المحيطى العام، بتحدد المسار الذى تقطعه مواد التتبع هذه خلال فترات زمنية تصل إلى عدة سنوات.

ولقد تم نشر شبكات ثابتة مجهزة بمحطات ذات تحكم ذاتى خلال السنوات الماضية. وشبكة الرصد على مستوى البحر تقوم على مجموعة من نحو ٣٠٠ جهاز قياس ارتفاع المد maregraphes موزعة على نسق واحد بطول جوانب المحيط العالمى وعلى أغلب جزره. وتحتوى هذه الشبكة على منظومة GLOSS (منظومة رصد مستوى البحر العالمية). وتم تجهيز شبكتى عوامات ثابتة (مُحتجزة بواسطة مراسى ذات عمق كبير) لقياس البارامترات الخاصة بتغيرات المحيط - الجو، ودرجة الحرارة وتيارات السطح، وتتيح كذلك التتبع عبر الوقت الفعلى لتطور المحيطات الاستوائية: الشبكة TAO فى المحيط الهادى الاستوائى، وشبكة PIRATA للمحيط الأطلنطى الاستوائى. وهناك شبكة أخرى تتيح اختبار عينات من المحيط السطحى بمساعدة مجموعة من سفن تجارية تتعاون طوعيًا فى إجراء قياسات درجة الحرارة فى الـ ٧٠٠ متر الأولى من السطح: منظومة صائبة

XBT تتيح قياس مقاطع رأسية لدرجة الحرارة انطلاقًا من سفينة عابرة، وتــسجيل هذه القياسات على ظهر السفينة، ونقلها عبر شبكة أقمار صناعية للاستقبال لكي يتم جمعها بواسطة مراكز معالجة لهذه المعطيات في وقت فعلي.

وسوف يتم استكمال تلك الشبكات بمحطات الرصد الأخرى الأكثــر تعقيــدًا القائمة على منظومات تلقائية تتيح قياس ســرعة التيــارات، ودرجـــة الحـــرارة، والملوحة، والبارامترات الرئيسية الكيميائية الحيوية مثل الأزوتــات، والفوســفات، والسيليكات، والأكسجين، والكلوروفيل...، في كل عمود ماء، من السطح والأعماق. وسوف يتم إجراء تلك القياسات بتواتر يومي منتظم وسيتم نقل المعطيات في وقت فعلي بالأقمار الصناعية. ومثال لهــذه التقنيــة المنظومــة الفرنــسية YOYO - ANAIS.



الشكل (٤)

منظومات رصد داخل المحيط.

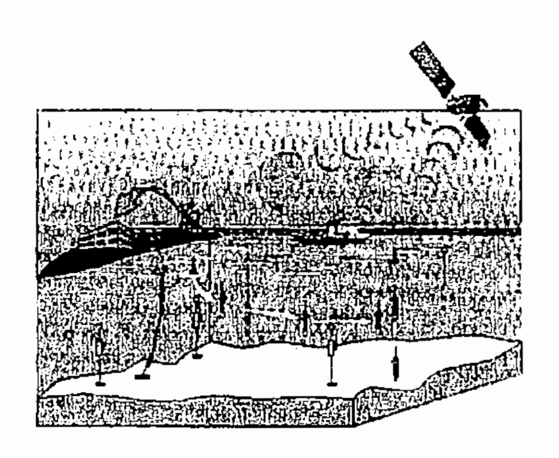
١ – عوامات تطفو على السطح.

٢ – خطوط مراسي ثابتة.

٣ – قياسات انطلاقاً من سفن خاصة بعلم المحيطات.

٤ – عوامات طافية تحت السطح.

لقد لاحظنا فيما سبق أهمية معرفة درجة الحرارة والملوحة لكتل الماء لتعيين حركاتها. ولقد وصلت تقنية القياس من الآن فصاعدًا إلى مستوى أمان وفعالية كافية لإتاحة تنفيذ منظومة رصد جديدة ثورية: برنامج ARGO. سوف يؤدى إلى بذر المحيط بآلاف من العوامات. وسوف تطفو هذه العوامات الذكية على أعماق مختارة (١٠٠٠ متر مثلاً)، وستغوص كل ١٥ يومًا حتى ٢٠٠٠ متر ثم تصعد بسرعة حتى السطح وهى تقيس درجة الحرارة والملوحة على طول هذا المقطع الرأسى (الشكل ٥). وستنقل العوامات معطياتها خلال بقائها على السطح عبر منظومة أقمار صناعية جامعة لترسلها إلى مراكز تحليل. إنها بعثة كاملة، فهذه العوامات تغطس بحصافة نحو الأعماق. وليس هذا البرنامج حلمًا. وتتوقع الأسرة الدولية تنفيذ هذا المشروع فى ٢٠٠٣: ٣٠٠٠ عوامة يجب أن توضع حينئذ للغوص فى كل محيطات العالم.



الشكل (٥)

منظومة قياس درجة للحرارة والملوحة فى الزمن الفعلي

(منظومة ARGO) بمساعدة عوامات غواصة.

ومن المعروف أن هذه الأنشطة هى إلى حد ما خطوات بارزة نحو منظومة رصد عالمية ودائمة للمحيط يحتاجها العلماء، ونحو علم محيطات عملياتى. وسوف تستفيد الأسرة العلمية من موجات المعطيات المنتظمة تلك لدراسة كيفية تطور المحيط على المدى البعيد. وبالتأكيد يجب على التوازى مواصلة إنجاز برامج دراسة مكرسة لفهم العمليات الأساسية التى تحكم محيطنا، لمعرفة أفضل لـ "فائدة" هذه الأرصاد، حتى يمكن تحسين القوانين الفيزيائية، وتجارب الديناميكا الحرارية، والكيمياء الحيوية للتعبير عن هذا الفهم بمصطلحات رياضية - وهو ما نطلق عليه "عمل نموذج" للمحيط - ومن أجل كفاءة أفضل فى التنبؤ بمستقبل هذا المحيط.

عمل نموذج للمحيط
وتمثيل للأرصاد

شهد عمل نموذج رقمى للمحيط تطورًا كبيرًا خلال السنوات الماضية، بفضل النمو الأسى لطرائق الحساب والتوظيفات الضخمة لفرق الأبحاث. ومع ذلك فإن حدود قدرات الحساب لأجهزة الكمبيوتر الراهنة ترغمنا أيضًا على تمييز نوعين من عمل النموذج. ومن ناحية، فإن عمل نماذج دقة التفاصيل resolution "المنخفضة" تتيح إنجاز عمليات محاكاة لعدة مئات من السنوات، للدراسات المناخية فى المدى البعيد. ومن ناحية أخرى، فإن عمل نماذج دقة التفاصيل "المرتفعة" يكون محدودًا بعمليات محاكاة للمحيط خلال فترات تمتد لعدة عشرات السنوات، لكنها تُنتج الأعاصير والجبهات المحيطية التى تضمن عمليات امتزاج كتل الماء.

ولدراسة النماذج بطرائق تقلبية مناخية ومن أجل عمليات محاكاة طويلة تهدف إلى فهم أفضل للتطور المناخى، تتم المزاوجة من الآن بين هذه النماذج ونماذج الغلاف الجوى، وبين الغلاف الحيوى[٢٨] والغلاف المتجمد.[٢٩] وتعيد

---

(٢٨) الغلاف الحيوى biosphere: الجزء الذى تشغله الأحياء من سطح الأرض. (المترجم)

(٢٩) الغلاف المتجمد cryosphere: هو الغلاف البارد للأرض ويحتوى على بحر الجليد، وجليد الماء العذب، والثلج، و الأنهار الجليدية، والأرض المتجمدة، والجمد السرمدى تلك الطبقة المتجلدة باستمرار على عمق متفاوت تحت سطح الأرض فى المناطق القطبية المتجمدة. (المترجم)

عمليات المحاكاة الماضى (حتى نشوء المناخات القديمة paleoclimats) وتتنبأ بالمستقبل. والأمثلة الجيدة لذلك هى دراسات السيناريوهات المصاحبة لتطور محتوى الغلاف الجوى بالغاز فى ظاهرة الاحتباس الحرارى.

ويصبح عمل نماذج ذات دقة عالية فى التفاصيل (أقل من نحو عشرة كيلومترات) أكثر فأكثر واقعية. وبواسطة هذه النماذج يمكن من الآن أن ندرس بشكل أكثر عمقًا آليات التفاعل بين التيارات المحيطية وتطور التركيب الكيميائى الحيوى لكتل الماء. ويمكن كذلك أن نفهم بشكل أفضل تأثيراتها على النشوء الأولى المحيطى وأن نعرف بشكل أفضل الدور الذى يلعبه المحيط فى تطور محتوى غاز الفحم للغلاف الجوى لكوكبنا.

وفى النهاية، كما لاحظنا سابقًا، سيصبح عمل نماذج للمناطق الساحلية أكثر فأكثر ضرورة للتنبؤ بتطور البيئة الساحلية. وعمل النماذج هذا أمر معقد وسوف يحتاج إلى جهود خاصة حتى نفهم بشكل أفضل مثلاً عمليات المد والجزر وموجات العاصفة، شديدة العنف فى الوقت الراهن.

ويلجأ توليف هذه الأحجام الضخمة من المعطيات التى ستتوافر من خلال منظومات الرصد السابق وصفها، إلى "تمثيل" تلك المعلومات فى نماذج فيزيائية وكيميائية حيوية سبق إقرارها. وسوف يتيح هذا التأليف فى المستقبل الحصول بشكل منتظم على وصف أفضل لحالة المحيط وتطوره على المستوى الإجمالى، وعلى المستوى المتوسط لكل حوض محيطى، وعلى مستوى الحواف القارية، ومستوى المناطق الساحلية.

الاستنتاجات

يمكن أن نوجز فى بعض كلمات هذا الوصف السريع لعلم المحيطات الحديث. وكان من جانبه الأساسى استكشافيًا ووصفيًا حتى بداية الخمسينيات، ثم

تقدم بسرعة منذ النصف الثانى لذلك القرن. وجلب له تطور تقنيات الرصد في الوقت الفعلى "بشكل ثورى" الكشف الفضائى عن بعد، وتحسين وتنظيم الوسائل على المستوى الدولى، وأتاح النمو الأسي للحاسبات خطوات واسعة فى معارفنا في مجال علم المحيطات.

لكن عصرًا جديدًا قد لاح فى علم المحيطات. ويجب أن نجيب عن أسئلة حول تطور مناخنا، وعن حماية نوعية بيئتنا، وعن المحافظة على مواردنا البحرية. وستأتى الإجابات من برامج جديدة دولية فى طور الإعداد: CLIVAR، وGOOS، وGODAE (التجربة العالمية لتمثيل البيانات). وسوف تؤدى تلك البرامج إلى إعداد شبكات رصد ضرورية لرصد المحيط على المدى البعيد. وهذا تحدٍ جديد لأسرة علم المحيطات الذى دخل، على هيئة علم أرصاد جوية منذ خمس وعشرين سنة، فى عصر علم المحيطات "العملياتى".

الأنهار تحت البحار
والتيارات وظواهر المد والجزر[٣٠]

بقلم: جان-فرانسوا مينستيه
Jean-Francois MINSTER

ترجمة: عزت عامر

سوف أبدأ بقصة قصيرة طريفة: رُسمت أول خريطة لتيار الخليج gulf stream في ١٧٧٧ بواسطة بنيامين فرانكلين Benjamin Franclin. وسبب ذلك كان مدهشًا. في هذا العهد كان فرانكلين مديرًا للبريد في أمريكا التي كانت لا تزال مستعمرة. وكان قد اكتشف أن السفن التي تنقل البريد من إنجلترا إلى أمريكا تستغرق ما يقرب قليلاً من أسبوعين أكثر من مسارها في العودة. وحينئذ سأل أحد أبناء عمه الذي كان صياد حيتان والذي أوضح له أن تيارًا كان يجري في سعة بطول السواحل الأمريكية. حينئذ طلب بنيامين فرانكلين من كل السفن بأن تتخذ مسارًا بين القارتين وتحدد موقعها بالنسبة للنجوم، وأن تسجل مقياس سرعة السفينة loch، أي مسار السفينة بالنسبة للماء مع تقدير الفارق بهدف استنباط خريطة للتيارات. وشيئًا فشيئًا أنجز أول خريطة لتيار الخليج. وطلب حينئذ من السفن التي كانت تنقل البريد أن تجرب دائمًا الإقلاع من بوسطون نحو الجنوب حتى تتجنب تيار الخليج لأنه، كما قال، عبارة عن نهر في البحر لم ينجح أحد في العثور عليه.

كانت خريطة تيار الخليج لبنيامين فرانكلين بسيطة جدًا: كانت مجرد نوع من الشرائط الضخمة عبر الأطلنطي. والسؤال الذي يمكن طرحه في الوقت الراهن يدور حول معرفة مكان تيار الخليج، في الواقع. وكيف يتغير خلال الزمن؟ وبأية سرعة وعلى أي عمق يتدفق؟ وما مقدار كمية الماء التي ينقلها؟ وفي

---

(٣٠)نص المحاضرة رقم ٢٠٢ التي ألقيت في إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٠ يوليو ٢٠٠٠.

الحقيقة، عندما نطرح هذه الأسئلة، ندرك أنه ليس لدينا الكثير من الإدراك البـديهى للمحيطات.

ما الأسباب المهمة لدراسة المحيط؟

السبب الأول يرتبط بعمليات نقل الحرارة. والوحدة المستخدمة هـى $١٠^{١٥}$ وات، مليون مليار وات، وهو ما يمثل مائة مرة الطاقة الكلية التى ينتجها الإنسان. ونقل الأرض للحرارة معروف بشكل جيد. يستقبل كوكبنا حـرارة زائـدة علـى مستوى خط الاستواء، أى أنه يستقبل حرارة من الشمس أكثر من تلك التى يفقـدها ببثها فى الفضاء. وهذا عكس ما يحدث عند القطبين. وهذه الزيادة، أو هذا النقص، يتم معادلتهما بالنقل من خط الاستواء إلى القطبين. وهذا يحدث من جانب بواسـطة المحيط ومن جانب آخر بواسطة الغلاف الجوى، أى على التوالى بواسطة التيارات وبواسطة الرياح، والأرض فى الواقع ماكينة حرارية عملاقة.

والنقل الإجمالى للحرارة معروف بشكل جيد إلى درجة كافية لأننـا نعينـه انطلاقًا من أرصاد من الفضاء: نقيس عند كل خط عرض ما يدخل، كمية حـرارة الشمس، وما ينعكس، وما يخرج على هيئة حرارة تحت حمراء تبثها الأرض (تبث الأرض أشعة تحت حمراء كما تفعل أنت وأنا). بهذه الطريقة نعرف الميزانية عند كل خط عرض، باستنتاج ما يجب نقله لموازنة هذه الميزانية. وكان منحنى النقـل بالغلاف الجوى معروف منذ نهاية السبعينيات؛ لأن نموذجًا جويًا كان يمثـل فـى الواقع الغلاف الجوى، يتيح حساب كمية الحرارة التى ينقلها الجو. والفـرق بـين الاثنين يكون مسبقًا ما يفعله المحيط. وهكذا نجد أن المحيط والغلاف الجوى يلعبان الدور نفسه تقريبًا.

وهذا التقدير تم إنجازه فى بدء الأمر بواسطة أحد أعظم علماء المحيطـات فى القرن، هنرى ستوميل Henri Stommel، فى ١٩٧٩. ولم تكن هذه النتيجة فى ذلك العهد واضحة تمامًا: ومن جانب آخر، كانت أعمـال علـم المحيطـات فـى

الخمسينيات توضح أن المحيط يلعب دورًا أقل فى الآلة المناخية. وفى الواقع، أشار ستوميل، فى ١٩٧٩، إلى أنه لوصف المناخ، يجب أن نضع فى الحسبان المحيط والغلاف الجوى. أى يجب أن ندرك أن الأخطاء فى هذه التقديرات مهمة: فى ١٩٧٩، كانت ١٠٠ فى المائة تقريبًا! ومن جانب آخر، لا يمكن أن تكفى معلومتين لاستنتاج الثالثة: يجب أن نحاول تحديد هذه أيضًا، وأن نعرف ما إذا كانت معرفتنا بالمنظومة متسقة. ولهذا السبب فى ذلك العهد كان القرار بتنظيم تجربة واسعة لدراسة التيارات المحيطية، وتعيين نقلها للحرارة. وأطلق على تلك التجربة الواسعة تجربة دوران المحيط العالمى WOCE. ونحتاج إلى عشر سنوات للتجهيز، وتسع سنوات للتنفيذ لنصل إلى هذه النتيجة. ويعتمد هذا البرنامج على جهد ما يقرب من أربعين بلدًا.

أسئلة أخرى تتعلق بالتيارات المحيطية: فهى تؤثر، مثلاً، على الإنتاج الأولى السنوى أى كمية الكربون المركزة بواسطة النشاط البيولوجى فى المحيط السطحى. ويتم قياسها من الفضاء برصد "لون البحر". فالمحيط يكون أكثر خضرة عندما توجد عوالق. وهذه هى أول حد فى دورة الحياة فى المحيط. ويصل الرقم الإجمالى إلى ٣٨ مليار طن من الكربون سنويا، بقيمة كمية الكربون المركز للكتلة الحيوية biomass القارية نفسها.

وليس توزيع الإنتاج الأولى المحيطى تافهًا. وهناك مناطق حيث يكون إنتاج الكتلة الحيوية بالغ الضآلة، مثلاً فى المحيط الجنوبى، أو فى بحر سارجاس.[٣١] وسنذكر عرضًا أنه خلال السبعينيات كان يُظن أن المحيط سيغذى البشرية، وأنه لديه إنتاج كافٍ من العوالق حتى تكون هناك احتياطيات هائلة من الأسماك فى المحيط الجنوبى. ونعرف فى الوقت الراهن أن هذا ليس مخزن أغذية للبشرية. ونعرف أيضًا أن الإنسان يسرف فى استغلال احتياطى الأسماك فى المحيط، من

---

(٣١) سارجاس des Sargasses: منطقة واسعة فى الأطلنطى شمال شرق جزر الأنتيل مغطاة بالطحالب. (المترجم)

ناحية وجود انخفاض تدريجي، منذ نحو عشر سنوات، لكمية الأسماك التي يتم صيدها. وأحد المشاكل الخفية تنظيم هذا الصيد، الذي يحتاج إلى فهم كيفية عمل النشاط البيولوجي في المحيطات، وكيفية تجدد احتياطيات الأسماك، لأنهما هما اللذان ينقلان الأملاح المغذية (النترات مثلاً) التي تتغذى عليها العوالق.

وسبب ثالث لدراسة المحيط: إنها بيئة نشاط اقتصادي. وبشكل خاص، الغالبية العظمى من النفط يتم نقلها بالطرائق البحرية. ومن جانب آخر، أكثر من نصف سكان العالم يعيشون على ٣٠ كيلومترًا على الأقل من الشواطئ لأن الأنشطة الاقتصادية في المناطق الساحلية مهمة، ولأن المناخ فيها مُفضل، ولأن النقل بالبحر مهم. ومعرفة التيارات أمر مهم لهذا النشاط؛ لأنها هي التي تشتت الملوثات، أو لأن التيارات تؤثر على أنشطة النقل البحري...

المحيط متغير

المحيط بيئة متغيرة، وعلى سبيل المثال، إذا دققنا النظر في درجة حرارة سطح البحر، من ١٩٨٠ إلى ١٩٩٨، بالقرب من جزر جالاباجوس،[٣٢] نلاحظ انحراف في درجة الحرارة تتراوح بين ٠ و٤ درجات. وهذه أحد سمات ظاهرة النينو الشهيرة. وقد يبدو انحرافًا مقداره أربع درجات شيئًا ضئيلاً، إلا أن نصف سطح الأرض موجود بين ٣٠ درجة من خط العرض الشمالي والجنوبي، ويغطي المحيط الهادي ثلث محيط الأرض، وفي النهاية إن انحرافًا بهذا المقدار يتم الشعور به في سمك بين ١٠٠ و٢٠٠ متر.

ويمكن أن نرصد جيدًا التغيرات الأخرى للمحيط. يمكن مثلاً ذكر حالة التذبذبات التي تقع كل عشر سنوات للمحيط الأطلنطي الشمالي: بسبب دفء مؤقت، يحدث ذوبان لجليد البحر في بحر القطب الشمالي: وهو الذي يحمل الماء النقي إلى المحيط ويمكن تتبع نهاية ومسار هذا الانحراف في الملوحة خلال

---

(٣٢)جالاباجوس Galapagos: أرخبيل في المحيط الهادي شرق إكوادور. (المترجم)

الزمن. وهذا ما انتشر نحو جنوب بحر لابرادور فى ١٩٧٤. وتكوّنت الأنــشوطة خلال نحو عشر سنوات. وكانت مصحوبة بانحراف فى درجة حــرارة المحــيط، وانتهت إلى انحرافات فى المناخ فوق أوروبا: عندما تكون حالة المحيط دافئة على غير العادة، تكون منظومة الانخفاض فيه شاذة.

ومن الواضح أن إحدى المشاكل الضخمة التى تواجهنا هى نتــائج ظــاهرة الاحتباس الحرارى. ومنذ ١٨٦٠ حتى الآن، ارتفعت درجة الحــرارة نحــو ٠,٦ درجة. وعندما نحسب ما يحدث بمساعدة نموذج للمناخ، أى محاكاة رقميــة تمثــل حالة الجو وعلاقته بالمحيط، وتجلدات البحر والغلاف الحيوى، وما نبثه من ثــانى أكسيد الكربون وما نطلقه من رشاشات (أيروسول) فى الجو، يشبه منحنــى تــدفؤ المناخ الذى تحسبه هذه النماذج إلى حد كبير ما يتم رصده. ولا يبرهن ذلك تمامًــا على أن التدفؤ المرصود هو نتيجة ثانى أكسيد الكربون، لكنه مجرد مؤشر على أنه السبب المحتمل. ويلعب المحيط دورًا مهمًا فى كل تلك المنظومة.

كيفية دراسة المحيط

ومعنى كل هذا أننا نرغب فى فهم المحيط، ووصف التيارات ورصدها على الدوام. فلنرى قبل كل شىء ماذا تشبه التيارات. وتبين خريطة أطلــس جغرافــى بشكل عام أن التيارات على السطح تتكون من التفافات أنشوطية ضخمة، مثل تيار الخليج أو أن تيار الأطلنطى حول القطب يدور حول قارة القطب الجنوبى... إلــخ. وبالإضافة إلى ذلك يجب أن نعى أن المحيط تجوبه كذلك تيارات عميقة. وبــشكل إجمالى يبرد المحيط على السطح فى الأطلنطى الشمالى، ويــصبح المــاء ثقــيلاً، ويتدفق إلى القاع ويتسلل إلى أعماق البحر ثم يعود إلى السطح فى كل مكــان فــى المحيط تقريبًا، وخاصة فى المحيط الهندى والمحيط الهادى. وعلى السطح، وتحت تأثير حرارة الشمس، يسخن الماء ويعود نحو الأطلنطى الشمالى. وفى الحقيقة، فإن مسار جزئ من الماء يكون فى غاية التعقيد ويستغرق وقتًا: ابتــداء مــن المحــيط

الأطلنطى الشمالى ثم يوجد ثانية فى المحيط الهادى الشمالى ما بين ١٠٠٠ و ١٥٠٠ سنة بعد ذلك. وتتم عمليات نقل الحرارة فى المحيط كذلك بواسطة التيارات العميقة بقدر انتقالها بتيارات السطح.

ومن ثم يجب أن ندرس المحيط في مجمله، فى السطح كما فى العمق، وعبر الزمن. فكيف ننجز ذلك؟ ومن أجل التجربة WOCE حددنا برنامج رصد هيدروجرافى.[٣٣] وهذه أول أداة لعلم المحيطات وتقوم على إرسال سفن فى البحر تتوقف كل ١٥ إلى ٣٠ كم، وحينئذ يتم استخدام آلات فى طرف ملفاف رفع تتيح قياس خواص الماء (درجة الحرارة، الملوحة) حتى الأعماق. ويستغرق كل موقع بضع ساعات. ثم تواصل السفينة مسارها وتتوقف مرة ثانية لتقوم بالعمل نفسه فى موقع جديد. وتستغرق حملة عبر المحيط الهادى الجنوبى شهرين. وهذه الآلة الخاصة بعلم المحيطات ضرورية. ومثال لذلك يمكن بهذه الطريقة رسم تغيرات الملوحة فى المحيط: فى الألف متر الأولى، يكون الماء مالحًا جدًا فى المنطقة الاستوائية فى السطح لأنها منطقة تبخر، فهى دافئة، ويتبخر الماء. وبالعكس عندما نقترب أكثر من القطبين، يكون الماء أقل ملوحة، لأن الأمطار تكون كثيرة بكل بساطة، مما يجعل الماء عذبًا. ويُنقل الماء العذب بواسطة الجو من خط الاستواء نحو القطبين. وبالطبع يجب إعادة الماء قليل الملوحة من القطبين إلى خط الاستواء، وهو ما تقوم به التيارات.

وهذا لا يكفى: فواقع الحال أنه لا يمكن رصد المحيط خلال الزمن عن طريق حملات هيدروجرافية. وتقوم الفكرة الرئيسية على تجهيز السفن التجارية بمسابر يمكن فقدانها وتعمل بشكل تلقائى: وهى عبارة عن أسماك صناعية ابتداء منها تتحلّ بكرة خيط نحاسى أثناء سقوط السمكة فى الماء، وعلى رأس السمكة يوجد لاقط يقيس درجة حرارة الماء، فيما توفر سرعة السقوط معرفة العمق.

---

(٣٣) هيدروجرافى hydrographique: ما يتعلق بوصف المياه. (المترجم)

ويتم إلقاء آلاف من هذا النوع من الأسماك سنويًا. وخريطة الخيوط التى يتم تجهيزها هكذا تكون كثيفة نسبيًا لكنها أيضًا غير كافية. ومن جانب آخر فإن درجة الحرارة ليست سوى أحد البارامترات الواجب رصدها. وأخيرًا فإن هذه المسابر لا تفيد إلا فى أول ٨٠٠ متر فى الماء.

ويمكن أن نتصور إلقاء أدوات فى الماء، ويطلق عليها المراسى. يتم وضع كتلة مصبوبة من معدن فى قاع الماء. ثم يُسحب خيط إلى السطح بواسطة عوامات. وعلى الكبل يتم تعليق أدوات، مثلاً "أجهزة قياس تيار" التى تقيس سرعة التيارات فى الماء. وتستمر المرساة من ٢ إلى ٣ سنوات. وعدد تلك المراسى ضئيل جدًا. وفى الواقع فإن الجهة الوحيدة التى يمكن نشر رصد تلقائى من هذا النوع فيها هى المحيط الهادى الاستوائى. وتعمل سفينتان على انتشال هذه المجموعة من ٨٠ مرساة والمحافظة عليها فى حالة جيدة. والرهان يستحق العناء، لأن تلك المنطقة هى التى تحدث فيها ظاهرة النينو، حيث يكون للتنبؤ تأثير اقتصادى حتى أنه يفى بسخاء بتكاليف منظومة الرصد.

وحيث إن السفن هى التى تكلف كثيرًا، يجب إنشاء آلات تعمل بمفردها تمامًا. وكانت أول فكرة استخدام عوامات على سطح البحر يتم وضعها كل يوم بواسطة منظومة أرجوس Argos. ونجد دائمًا نحو ٢٠٠٠ عوامة من هذا النوع تنحرف مع التيارات. وتستمر تعمل من ٤ إلى ٥ سنوات. ومرة أخرى، فإن مجموعة القياس بعيدة عن أن تصبح كاملة.

قد نود الحصول على الشيء نفسه فى العمق. ولقد ابتكر علماء المحيطات شيئًا غير عادى: ويتعلق الأمر بعوامة أرغب فى تسميتها "يو – يو yo - yo". وهى عبارة عن عوامات يمكن لنا أن نغير كثافتها بفضل مضخة صغيرة تنقل الزيت من خزان إلى آخر، ويمكن للخزان الثانى أن ينتفخ أو يتقلص. ولا يتغير وزن العوامة لكن حجمها يتغير، وعندما يزداد حجمها تقل كثافتها تشرع فى الطفو، والعكس بالعكس. وبهذه الطريقة يمكن التحكم فى العمق الذى ستنساب إليه العوامة

حيث ستحرفها التيارات. ويمكننا برمجة ارتفاع العوامة الذى سيعطى حينئذ مقطعًا للقياسات فى الماء، حتى السطح، والذى سينقل حينئذ قياساته بواسطة قمر صناعى. ثم تكرر العمل نفسه. وتستمر تلك العوامة تعمل ٤ سنوات تقريبًا. والمشروع الذى طوّرناه على المقياس العالمى (هناك حتى الآن ١٣ دولة مشاركة فى هذه المغامرة) يتمثل فى نشر ٣٠٠٠ فى كل المحيط فى ٢٠٠٣ و٢٠٠٤.

بماذا يمكن أن تشبه مسارات تلك العوامات؟ ها هنا نكتشف تعقد المحيط. وفى الواقع، تكون تيارات المحيط مضطربة كما هو حال الرياح فى الجو. ففى لحظة محددة، وفى مكان محدد، يمكن للتيار أن يسير فى أى اتجاه، فى السطح أو فى العمق. ولا يمكن فى هذه الحالة الاكتفاء بعمل نقاط رصد من وقت لآخر: ويجب علينا، لكى نفهم المناخ، إجراء أرصاد كثيفة تتيح تعيين وغربلة التقلبات على مسافات أكثر صغرًا بكثير فى المكان والزمان.

ولهذا الغرض نستخدم الأقمار الصناعية. وفى الواقع فإن شبكة رصد قمر صناعى تتكون مثلاً من نقطة قياس كل ٧ كم بطول مداره، وهو ما يناظر قياس خلال كل الثوانى. وتمتلئ هذه الشبكة فى عدة أيام. ومن جانب آخر فإن القمر الصناعى يعمل عدة سنوات. مثلاً تم إطلاق القمر الصناعى توبكس بوسيدون TOPEX/Poseidon فى ١٩٩٢، ويعمل على الدوام. وسوف يحل محله فى ٢٠٠١ شقيقه الصغير، ويطلق عليه جاسون Jason. وتم وضع هذا القمر فى مداره على ارتفاع ١٣٣٠ كم، ويحمل رادارًا يقيس المسافة إلى سطح البحر بدقة تصل إلى ٢ سم. ويجب من جانب آخر معرفة أين يكون القمر على مداره: ويتم حساب ذلك بالنسبة لمركز الأرض إلى ٣ سم تقريبًا. وبالفرق بين هذين القياسين يمكننا حساب ارتفاع البحر بالنسبة لمركز الأرض. وبإعداد الحسابات تكون الدقة متناهية. ولإعطاء فكرة عن هذا الأمر، من ١٩٩٢ حتى عام ٢٠٠٠ (وهو ما يمثل تقريبًا ٢٥٠٠ يوم رصد) تم رصد تغير فى الارتفاع المتوسط للبحر قيمته ١,٥ مم/سنة!

هذه من ثم الأداة الثانية، الأقمار الصناعية، التى بفضلها يمكن أن نقيس فى الوقت الراهن بشكل روتينى عدد بالغ الضخامة من البارامترات: التيارات، ولكن أيضًا عمليات المد والجزر، درجة حرارة البحر، الريح، امتداد جليد البحر، وتوزيع العوالق... وميزة الأقمار الصناعية أننا نقيس تلك البارامترات بشكل متواصل، وعلى وجه الإجمال، وبطريقة متكررة ومتجانسة.

فى النهاية يتم إعداد المحاكاة الرقمية: ونحن نعرف فى الوقت الراهن بدرجة كافية جدًا عمل المحيط (أى المعادلات التى تصف التيارات) حتى يمكن تمثيل حالة المحيط على الكمبيوتر. ويكون تحت تصرفنا قدرات حساب كافية لإجراء تلك الحسابات على الأقل على مقياس محيط مثل المحيط الأطلنطى.

وبناء عليه فإن لدى علماء المحيطات ثلاث أدوات: المعطيات في موضعها الأصلى، معطيات الأقمار الصناعية (أرصاد التيارات من الفضاء)، والنماذج الرقمية. لذلك فلديهم إمكانية الحصول على ثلاثة تقديرات للانتقالات بواسطة التيارات، وبشكل خاص انتقالات الحرارة فى المحيط. وفى الوقت الراهن، بعد تجربة WOCE، أصبحت التقديرات متقاربة، مع وجود خطأ من ٢٠ إلى ٣٠ فى المائة. لذلك يفكرون فى الوقت الحالى فى الحصول على معرفة كافية إلى درجة كبيرة بالتيارات والمحيط للتفكير فى المستقبل.

المستقبل هو التنبؤ

يجب التنبؤ بحالة التيارات غدًا لمعرفة كيف ستتغير، وما سيحدث بالنسبة للتطبيقات الاقتصادية، أو لدراسة مناخ الغد إذا كانت هناك سخونة مناخية. ولعمل ذلك تلزم أداة ومنهج عمل جديد. يلزم فى الواقع تمثيل للتيارات، أى نماذج رقمية لأن هذه هى الأداة الوحيدة التى تتيح عمل تنبؤات. وببساطة، لن يتحقق النموذج الرقمى بشكل كامل أبدًا لأن المحيط فى حالة فوضى، ولأن التيارات لا يمكن توقعها أبعد من أجل محدد. وبالتالى يجب إجراء أرصاد دون توقف لدعم حالة

النموذج، كما هو الحال مع التنبؤ فى علم الأرصاد الجوية. ويُطلق على أداة دعم حالة النموذج "تمثّل المعطيات l`assimilation": أى أن النموذج الرقمى يتمثّل بيانات الأرصاد. ويعتبر ذلك حسابًا شاقًا، أكثر صعوبة تقريبًا بمقدار عشر مرات من النموذج الرقمى نفسه، لذلك نحتاج لإنجاز هذا الأمر إلى حاسبات الجيل المقبل.

وعلى هذا الاعتبار سيصبح النموذج أمرًا واقعًا ويتيح إجراء التنبؤ بالتيارات. وليس هذا التنبؤ مثيرًا للاهتمام فى حد ذاته: ما يريده العميل هو نوع من الأداة يستفيد منها هو ذاته. فالعسكرى يريد مجال انتشار صوتى للكشف عن غواصته، والسفينة التجارية تريد خريطة تيارات لمعرفة إلى أين توجه مسارها، والمدبر يريد أن يعرف أين يمكنه تفريغ قاربه الملئ بالنفايات، لكى يتجنب تلويث المكان الذى يبيض فيه السمك أو تلويث الشواطئ.. وبناء عليه يجب تحويل هذا التنبؤ بالتيارات إلى معلومة قابلة للاستخدام بواسطة المنتفعين.

ونعرف فى الوقت الراهن كيف نجرى تنبؤات بتغير درجة الحرارة عند حدوث ظاهرة النينو لآجال من ثلاثة إلى ستة أشهر. من جهة أخرى تم التنبؤ بشكل صحيح بالموقف من ١٩٩٧ حتى ١٩٩٨. ولاحظ أنه يوجد اختلاف كبير بين التنبؤ فى علم الأرصاد الجوية والتنبؤ بالمناخ. ففى الحالة الأخيرة لا نبحث بالضرورة عن معرفة ما إذا كان سيحدث شذوذ فى منطقة ما من المحيط بالقرب من جزيرة ما، ولكننا نبحث غالبًا عن معرفة، مجملة بما إذا كان الجو سيكون أكثر حرارة أو برودة. وفى هذه الحالة فإن التنبؤ الذى نقوم به يكون إحصائيًا: ولهذا الغرض يتم عمل الكثير من عمليات المحاكاة ودراسة المتوسط الإحصائى لحدوث الظواهر.

ويمكننا أيضًا التنبؤ بالتيارات المحيطية على مقياس شهر. وهكذا قدمت المصلحة البحرية للهيدوجرافيا وعلم المحيطات، فى تولوز، تنبؤات فى مجال التيارات فى الأطلنطى الشمالى الشرقى. وقُدمت تلك التنبؤات لسفن علم المحيطات أو للسفن الحربية. حينئذ يتم البدء فى التطلع إلى تطبيقات عملية. مثلاً، جمعية

خدمات تتبع انحرافات التيارات للصيادين، وهو ما يخدمهم فى المعرفة الأفضل بأماكن الصيد وخاصة فى ناحية موزمبيق - ولا يتعلق الأمر بوفرة الصيد ولكن بالصيد بنفقات أقل بالذهاب مباشرة إلى هناك حيث توجد أسماك التون.

لذلك نحن فى الوقت الراهن فى طريقنا إلى إنشاء أدوات تتبؤ محيطية. وكل التقنيات مهيأة، لكن يجب تحويلها إلى واقع ملموس، وتكون قابلة للاستخدام بواسطة الجميع. ومن ثم يجب علينا أن نصبح عمليين. وهو ما نعمل على تنفيذه.

الأعماق السحيقة للمحيطات
ومناجم معادن المستقبل[٣٤]

بقلم: تييرى جيتو
Thierry JUTEAU

ترجمة: عزت عامر

الظهير المحيطى العالمى

تتجدد الأعماق المحيطية بشكل دائم ببث صخر بركانى منصهر بزلتى إلى مستوى الظهير المحيطى العالمى. وفى الإطار النظرى لبنائية الصفائح، هذا ما يطلق عليه "التجميع المستمر للأعماق المحيطية". ويعتبر الظهير المحيطى أضخم سلسة بركانية نشطة للأرض (الشكل ١). وهو أيضًا، إلى حد بعيد، المصدر الرئيسى للصخور البركانية المنصهرة والجوفية على سطح الكرة الأرضية. وهذه السلسلة البركانية الهائلة بأكملها تحت البحر (باستثناء فى أماكن نادرة حيث يؤدى الالتقاء بـ "نقطة ساخنة" إلى بروز الظهير، كما هو الحال فى إيسلاندا). وهى تمتد بطول نحو ٦٠٠٠٠ كم عبر محيطات الأرض، وتشغل تضاريسها اتساعات من نحو ١٠٠٠ إلى ٣٠٠٠ كم، وهو ما يمثل ثلث السطح الكلى للأعماق المحيطية. ويبلغ أوج قمة الظهير فى المتوسط - ٢٥٠٠ متر ويرتفع من ثم إلى ٢,٥ إلى ٣ كم فوق السهول العظمى السحيقة التى تفصل بينها حواف قارية.

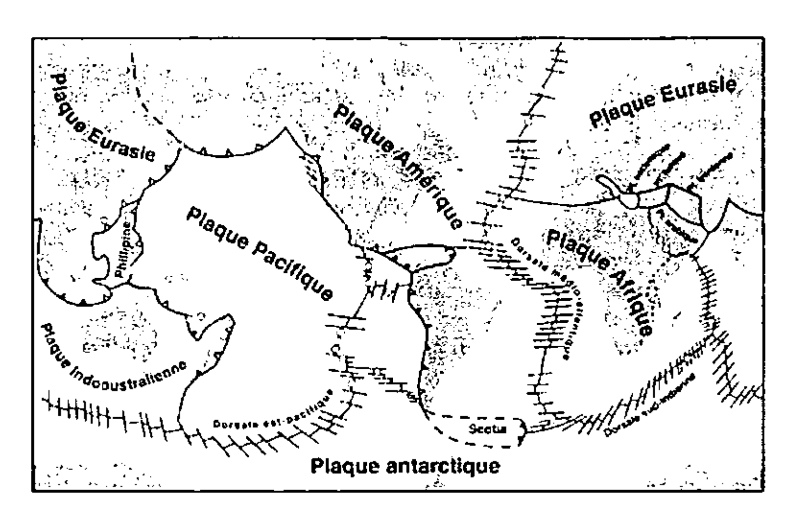
وفى النهاية، يجب أن نضيف إلى ما سبق مناطق تجميع ثانوية لأحواض القوس الخلفى (حوض فيدجى الشمال،[٣٥] وحوض Lau، وحوض Woodlark،

---

(٣٤)نص المحاضرة رقم ٢٠٣ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢١ يوليو ٢٠٠٠.

(٣٥)جزر فيدجى fidji: دولة Oceanie التى تتكون من أرخبيل الجزر الرئيسية فيه هى فيتى ليفى Viti Levu وفانوا ليفى Vanua Levu، وهذه الجزر واقعة جنوب وغرب ووسط المحيط الهادى. (المترجم)

وحوض Manus فى جنوب غرب المحيط الهادى، وصدع Caiman فى البحر الكريبى، ..إلخ). وفى منطقة جنوب غرب المحيط الهادى، كشفت أعمال خرائطية تفصيلية وجود، فى كثير من تلك الأحواض، قطع من الظهير المحيطى يمكن أن تمتد أحياناً لأكثر من ١٠٠٠ كم (حوض فيدجى الشمالى مثلاً).



الشكل (١)

خريطة المحيط العالمى، توضح الظهير المحيطى العالمى، وتوضح التجاويف المحيطية الرئيسية مناطق انزلاق الصفائح، وأماكن نطاقات المزج بالكبريت sulfures الشاسعة الحرارية المائية المعروفة حاليًا فى المحيطات.
(تبعًا لإيفيز فوكويه Yves FOUQUET، مركز بريست Brest، نوفمبر ١٩٩٩، مع التبسيط)

بركانية الظهير تحت البحر

تحت الطبقة الرسوبية التى تغطى عمق المحيطات الراهنة، يتكون الكساء الصلب، الذى يؤلف قمة القشرة المحيطة، أينما كان من مواد بزلتية منصهرة. هذا ما أثبتته بإسهاب نحو مائة من ثقوب البرنامجين الدوليين (مشروع الثقب العميق

للبحر DSDP)، ثم (برنامج ثقب المحيط ODP)، فى كل محيطات العالم. وهذه الطبقة البزلتية التى يصل سمكها إلى عدة مئات الأمتار فى المتوسط نشأت واستقرت بطول كل الظهير المحيطى العالمى. وهى تشغل فى الوقت الراهن نحو ٣٦٠ مليون كم٢، وهو سطح أوسع بكثير من سطح القارات.

ولا تزال بركانية هذه الأعماق السحيقة غير معروفة بشكل جيد. وعلينا أن ننتبه إلى أنه لم يتم رصد أى ثوران عميق حتى الوقت الحالى، حتى ولو أمكن رصد سوائل منصهرة قديمة لعدة أيام بالكاد، بواسطة غواصة على ظهير المحيط الهادى الغربى. وتكوّن المنطقة البركانية النشيطة للظهير شريطًا ضيقًا، عرضه غالبًا أقل من كيلومتر، على محور الظهير نفسه. وتتصف هذه المنطقة النشيطة بالمظهر الأسود واللامع للزجاج البزلتى، وبالعدد الكبير من النتوءات الزجاجية الهشة على سطح الحمم، وبالغياب التام للرسوبيات ولحيوانات الحقب الجيولوجية. وفى العمق السحيق يتعرض البزلت، المنطلق عند درجة حرارة ١٢٠٠ درجة منوية، على السطح لتصلد حرارى بالغ العنف لدى خروجه فى ماء البحر الجليدى عند درجة ٢ منوية. وتأثير هذا التصلد الحرارى على تشكّل المواد المنصهرة يعتمد بشكل أساسى على "حجم" الحمم المنطلقة:

– إطلاق أحجام معتدلة من الحمم يقود دائمًا إلى تكوّن حمم على هيئة وسائد، أو حمم على شكل وسادة pillow - lavas، تتألف من كتل متدفقة بتشكّلات متنوعة بشكل لافت للنظر، وتكون فى أغلب الأحيان أنبوبية، لكنها لا تكون أبدًا منبسطة السطح. وتتحول الحمم البزلتية فورًا إلى زجاج على السطح، ويكون سمك تلك الطبقة من الزجاج من ١ إلى ٢ سم تمنع المادة المنصهرة من الانتشار على السطح، وتضطرها إلى التدفق على هيئة أصابع قفازات. وتكوّن أنابيب تتداخل بعضها فى بعض وتتقدم نحو قاعدة المنحدر بتشظيات متتالية للقشرة الزجاجية الأمامية. ويعمل الضغط الداخلى للحمم الذائبة من جانب آخر على انهيار القشرة الزجاجية فى أماكن متعدد، وهو ما يؤدى إلى تكون نتوءات زجاجية ومواد منصهرة صغيرة ثانوية.

- ويؤدى إطلاق أحجام كبيرة إلى تكوّن كتل متدفقة بتشكلات مسطحة من الناحية الأساسية: بحيرات من الحمم، مواد منصهرة سائلة ومواد منصهرة ضخمة. وينتج عن عمليات الإطلاق التشققى بالغ الضخامة بحيرات حمم. وينتج التصلد الحرارى قليل التأثير على الحجم الضخم جدًا للحمم عن صدع ضخم. ومن المتوقع أن تخسف تلك الكتلة المتأججة بكل التجوفات الطوبوغرافية الموجودة فى طريقها، لتشكّل بحيرة فعلية من الحمم المؤقتة، حيث يتقطع سطحها، المنبسط لعدة كيلومترات مربعة، على تموجات وسائد الحمم المتكونة.

وعلى مستوى قطعة من الظهير، فإن النسبة بين الأسطح المغطاة على التوالى ببحيرات الحمم (بما فيها المواد المنصهرة السائلة) ووسادة الحمم تترابط بطريقة شبه خطية مع معدلات التجميع: فتكون قصوى وتقترب من ١٠٠ فى المائة على القطع الأكثر سرعة من الظهير غرب المحيط الهادى، وفى حدها الأدنى وتحت ١٠ فى المائة على قطع الظهير الأكثر بطءًا مثلاً على الظهير وسط الأطلنطى، أو أيضًا فى الصدع المحورى للبحر الأحمر، حيث النسبة مواد منصهرة سائلة / وسائد تقترب من الصفر.

البنائية على المحور والدورة البركانية - البنائية

تتعرض على الفور القشرة المحيطية خلال برودتها، وتكون بالكاد قد نشأت عند المحور، إلى قوى تمدد انفصال الصفائح وتتجرف جانبيًا بعيدًا عن المحور. وتنمو أسطح صدع لا تُحصى فى القشرة الهشة، وتقطعه إلى سلسلة من كتل حواشى تصدعات.

وتكون الشقوق المفتوحة العلامات السطحية الأكثر شيوعًا للفتق البنائى للمنطقة المحورية. وعلى وجه التحديد فإنها لا تشير إلى زحزحة رأسية لصدعين. وتمثل المنحدرات الشديدة للتصدعات العادية تحت - العمودية، الموازية لمحور الظهير، النوع الآخر من البنية البنائية الشائعة للغاية فى المنطقة المحورية.

وتتراوح إزاحتها الرأسية بين بضع عشرات السنتيمترات إلى عدة عشرات من الأمتار. ومن جانبى المنطقة البركانية المحورية، تقطع تلك التصدعات القشرة المحيطية الجديدة إلى سلسلة من الكتل التى ارتفعت (البنية المتشكلة[٣٦]) ومن كتل منهارة (انخفاضات بين تصدعات)، موازية للمحور. وتم رسم تصدعات ذات انفصالات وميلان ضئيل، وخاصة على تضاريس الظهير "البطيئة lentes" مثل ظهير وسط الأطلنطى.

وتشير الدراسات الحديثة إلى أن كل قطعة من الظهير تطورت خلال الزمن تبعًا لدورة بركانية - بنائية أساسية، تأثرت خلالها بالتبادل العمليات الصهارية، والبنائية، والحرارية المائية. وتنتج الحاجة إلى دورة بركانية - بنائية من حقيقة أن الثورانات البركانية للظهائر، كما هو الحال فى البركانية الهوائية، تكون متقطعة، فى حين أن عمليات التجميع، فى حد ذاتها، تكون متواصلة. ويكون كل ثوران بركانى مسبوقًا ومتبوعًا بمرحلة خمود أكثر أو أقل طولاً. وهكذا يمكن التمييز بين مراحل تجمع صهارية، وجيزة نسبيًا زمنيًا، تماثل الثورانات البركانية على السطح، ومراحل تجمع بنائية، تماثل أطوار توقف البركانية، والتى تخضع خلالها القشرة المحيطية المحورية الجديدة لقيود توسع بنائى خالص.

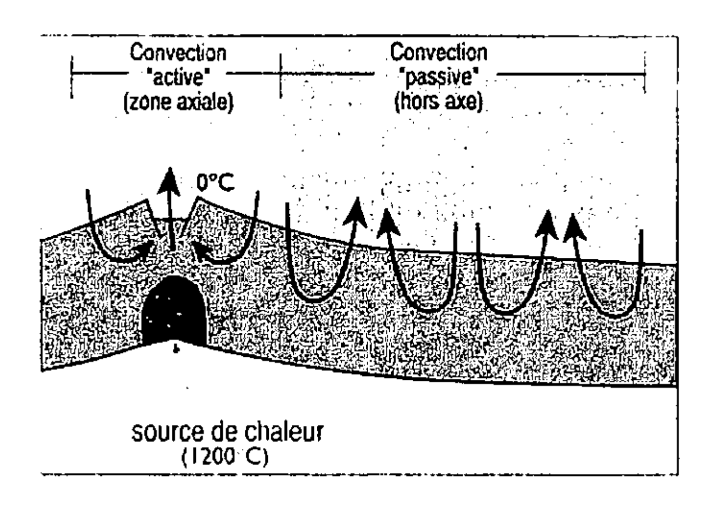
المدخنات السوداء، وواحة تحت البحر، والمعادن الخام

فور توطد الظهير فى المنطقة المحورية، تتعرض القشرة البزلتية التى تشكل الأرضية المحيطية الجديدة فورًا إلى تماس مع ماء البحر، الذى يتسرب إلى كل الشقوق والتجويفات، بواسطة كل مسام الطبقة البزلتية. وينتج عن التفاعل بين ماء البحر وصخور القشرة المحيطية تغيرات شديدة للخواص الفيزيائية، والكيميائية والمعدنية للقشرة المحيطية. ومن جانب آخر فإن تلك التغيرات الكيميائية تساهم فى ضبط كيمياء ماء البحر، وفى المحافظة على تكوين ثابت للمحيطات.

---

(٣٦)بنية متشكلة horsts: بنية تكتونية (بنائية) تشكلت من أراض ارتفعت بين التصدعات المتوازية فيما بينها. (المترجم)

وتعتبر النتائج المتعلقة بدراسات طبقات المعادن[٣٧] للتفاعل البزلت – الماء للبحر على مستوى الظهائر بالغة الأهمية. وامتد الاكتشاف الحديث نسبيًا لظهير شرق المحيط الهادى، وللمصادر الحرارية المائية الساخنة التى ترسب صخورًا كبريتية متعددة المعادن من الحديد، والنحاس والزنك ("المدخنات السوداء fumeurs noirs" الشهيرة)، وكذلك أكاسيد الحديد والمنجنيز، منذ ذلك الحين إلى كل ظهائر وأحواض القوس الخلفى arriere - arc.



الشكل (٢)

رسم تخطيطى يوضح نوعى نظامى الحمل الحرارى فى القشرة المحيطية.
تبعًا لتصورات ليستير Lister (١٩٨٢).
وفى الخلية الرأسية تتم المحافظة على دوران إيجابى لدرجة الحرارة المرتفعة بالوجود الدائم لمصدر قوى للحرارة (حيّز صهارى أو صخور مرتفعة السخونة). وفى النطاق خارج المحور، تتم المحافظة على دوران أقل كثيرًا فى درجة الحرارة (< ٢٠٠ درجة مئوية) بواسطة التبريد السلبى للقشرة والقشرة الأرضية فى مجملها.

---

(٣٧)ما يتعلق بدراسات طبقات المعادن mitallogenique: ما يرتبط بدراسة تكون الطبقات الحاوية على المعادن. (المترجم)

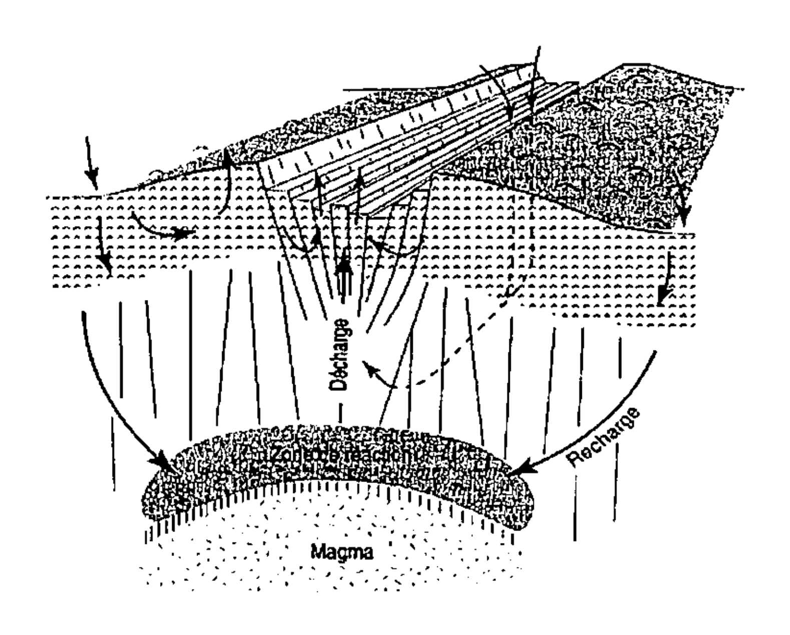
الحمل "الإيجابي" والحمل "السلبي"

يمكن التمييز بين نوعين من نظم الحمل لماء البحر في القشرة المحيطية (الشكل ٢):

- تنحصر المنظومات الإيجابية على وجه الدقة في المنطقة المحورية للظهائر، في سقف الخزانات الصهارية، حيث يتم استخلاص الحرارة نحو طبقة محددة. وفي تلك المنظومات تكون درجات الحرارة مرتفعة (درجة الحرارة > ٣٠٠ درجة مئوية)، ويكون الدوران الحراري المائي شديد القوة وسريع.

- تظهر المنظومات السلبية خارج المحور، وتكون الحرارة متاحة ببساطة بواسطة التبريد البطئ للقشرة المحيطية والقشرة الأرضية. وتكون درجات الحرارة أكثر انخفاضًا بشكل واضح (درجة الحرارة < ٢٠٠ درجة مئوية)، وسرعات الدوران أكثر بطئًا بكثير منها في المنظومات الإيجابية. والمنظومات السلبية أقل إثارة من المنظومات الإيجابية، ومن ثم أكثر صعوبة في اكتشافها ودراستها. ومع ذلك فإن تلك المنظومات هي التي تصرف أكبر كمية من الحرارة، على الأقل أكثر عشر مرات من المنظومات الإيجابية.

ويشير الشكل ٣ إلى الأجزاء المختلفة من منظومة حرارية مائية إيجابية على مستوى ظهير محيطي. وتحتوي هذه المنظومة على العديد من مناطق إعادة حمل منحدرة، بواسطتها ينفذ الماء البارد في القشرة ويقترب من سقف الحيز الصهاري، متفاعلاً مع كتل البزلت العابرة، عند درجات حرارة متزايدة. وفي "منطقة التفاعل مرتفع الحرارة" ZRHT، يتحول ماء البحر إلى سائل حراري مائي ساخن ويُثقل بالمعادن الذائبة وبالكبريت المختزل. ويصعد هذا السائل ذو الكثافة الضئيلة التي تقترب من الشروط الحرجة نحو السطح، وينحصر في مناطق تفريغ بؤرية أو منتشرة. وبهذه الطريقة يتم تصوير دوران حمل واقعي لماء البحر عبر القشرة المحيطية.



الشكل (٣)

رسم توضيحي يشير إلى الأجزاء المختلفة لمنظومة حرارية مائية

تحت البحر ظهرت على مستوى الظهائر المحيطية.

ينفذ ماء البحر البارد فى القشرة عن طريق مناطق شاسعة لإعادة الحمل،

ويتفاعل مع القشرة عند درجات حرارة متنامية خلال انتقاله إلى أسفل.

يحدث نوعان من التفاعل الكيميائى ذو درجة الحرارة المرتفعة

فى منطقة التفاعل، بالضبط فوق مصدر الحرارة

(وهو عادة حيز صهارى)، ومنه تصعد السوائل الحرارية المائية بسرعة

نحو السطح عن طريق مناطق إعادة حمل بؤرية أو منتشرة

جوانب دراسات طبقات المعادن للحرارية المائية المحيطية:

الرواسب الضخمة للكبريتات متعددة المعادن كتل الركام الكبريتى الضخمة فى الأعماق المحيطية واكتشاف مدخنات سوداء خلال العشرين سنة الماضية تم اكتشاف العديد من الرواسب الكبريتية متعددة المعادن على الأرضية المحيطية

العميقة، فى مواقع جيولوجية متنوعة (الشكل ١). ومن ناحية فكل هذه الرواسب معًا مقربة من مصدر حرارى، يستحث الدوران الحرارى المائى لماء البحر عبر الصخور المتصدعة والصدوع، والناحية الأخرى أن امتزاج السائل الحرارى المائى مع ماء البحر المحيط، يحث ترسيب الكبريتات المعدنية والمعادن الأخرى، على السطح أو بالضبط تحت الأرضية المحيطية.

وتحتوى هذه الرواسب على تركيزات مرتفعة من الزنك Zn، أو النحاس Cu، أو الرصاص Pb، أو الباريوم Ba، أو الفضة Ag، أو الذهب. وفى بيئات رسوبية بدرجة كبيرة يمكن لبعض منها أن يتراوح حجمه بين عدة ملايين إلى عشرات الملايين من الأطنان، وهو ما يضارع الترسيبات المماثلة التى تُستغل فى الأرض، ومع أن ١ فى المائة بالكاد من الأعماق المحيطية السحيقة قد تم استكشافها بالتفصيل، يمكن اليوم إحصاء أكثر من مائة من الرواسب الكبريتية متعددة المعادن على الأرضية المحيطية، والتى تقع أغلبيتها الساحقة فى المحيط الهادى (الشكل ١).

ولقد حدثت الاكتشافات الأولى للكبريتات متعددة المعادن فى منتصف الستينيات فى عدة حفر فى المنطقة المحورية للبحر الأحمر. وفى ١٩٧٧ تم اكتشاف مصادر دافئة محاطة بتكوينات حرارية مائية مثيرة على صدع جالاباجوس Galapagos. وفى ١٩٧٨ تم اكتشاف وأخذ عينات مواقد cheminees كبريتات هامدة على محور ظهير شرق المحيط الهادى عند درجة ٢١ شمالاً، خلال حملة فرنسية أمريكية للغطس. وبعد عام من هذا التاريخ فى ١٩٧٩، توصلت حملة أمريكية فرنسية فى المنطقة نفسها إلى الاكتشاف المرموق لنشاط حرارى مائى ذى حرارة مرتفعة، على هيئة مواقد كبريتات تقذف سائلاً حراريًا مائيًا أسود يمور عند درجة حرارة ٣٥٠ درجة مئوية، المدخنات السوداء الشهيرة (بالإنجليزية black smokers). وتتكون تلك المدخنات، المحاطة بمجموعة تكوينات حرارية مائية، بشكل رئيسى من كبريتات متعددة المعادن، والصوان الخامل وكبريتات الكلسيوم (أنهدريت) والباريوم.

وبعد ذلك تم اكتشاف مثل تلك الحقول الحرارية المائية ذات المدخنات السوداء فى العديد من الأماكن فى الظهير المحيطى العالمى، وكذلك فى عدد محدد من أحواض القوس الخلفى أو الهامشية، وعلى قمة بعض جبال البحر seanounts.

النموذج التكوينى Le modele genetique

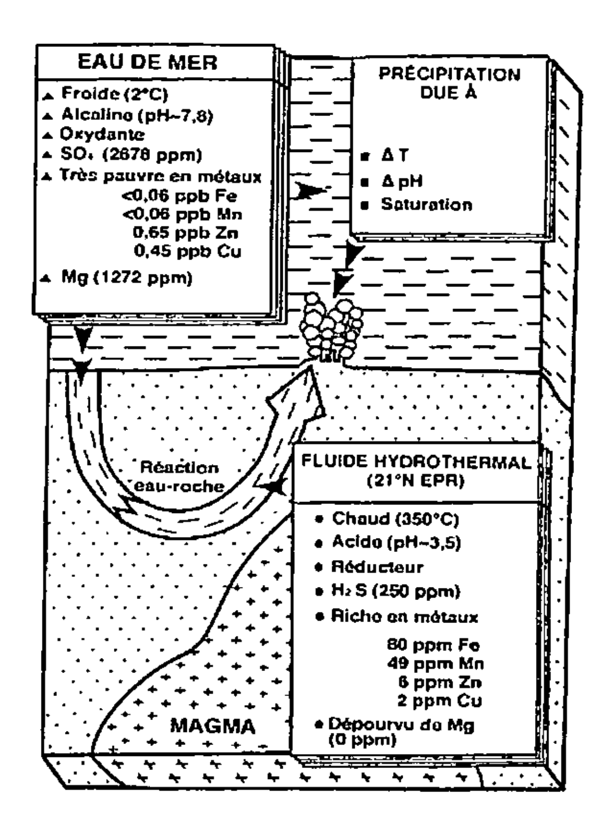
وبصفتها حالة نادرة تمامًا فى المنظر العام الحالى لعلم دراسة تكوّن الطبقات الحاوية على المعادن metallogenie فإن المدخنات السوداء تتيح الرصد فى الزمن الفعلى لتكون طبقة تحتوى على المعادن، وفى هذه الحالة ركام من الكبريتات متعددة المعادن. وترسب المياه الحرارية المائية الساخنة مباشرة كبريتات الحديد، والنحاس والزنك على الجانب الداخلى للمداخن. وتنتهى هذه المدخنات إلى الانهيار، وتتراكم شذراتها وتتشابك وتتدعم بواسطة المواد المعدنية ذات درجة الحرارة الأقل بكثير، لتشيد بالتدريج "ركام كبريتى amas sulfure" على الأرضية المحيطية البزلتية.

ونموذج تكوّن الطبقات الحاوية على المعادن metallogenique يكون هنا واضحًا بشكل خاص، على الأقل فى خطوطه العريضة (الشكل ٤): يتسرب الماء البارد فى القشرة المحيطية الجديدة بواسطة شقوق مفتوحة لا تُحصى تظهر فى تلك الأماكن، ويرسب هذا الماء، الذى يكون خفيف القلوية فى البداية (يقترب رقمه الهدروجين[٣٨] من ٨) كبريتاته وكربوناته، شيئًا فشيئًا بحيث تهبط وتسخن بالتدريج مع الاقتراب من الخزانات الصهارية. وعلى بعد نحو ٢ أو ٣ كم من العمق يسخن الماء فوق العادة إلى أعلى من ٣٥٠ درجة مئوية ويصبح شديد الحامضية (يقل رقمه الهدروجينى عن ٤) ويؤدى إلى التآكل بشدة، ويصعد نحو السطح على

---

(٣٨) الرقم الهدروجينى pH: مقياس عددى قيمه من صفر إلى ١٤/ يشير إلى تركيز أيونات الهدروجين والهدروكسيل – وبالتالى إلى درجة الحامضية (من صفر إلى ٧) أو القاعدية (من ٧ إلى ١٤) للمحلول. (يسمى أيضًا الأس الهدروجينى). (المترجم)

محور الظهير، ويذيب في طريقه المعادن والكبريت الموجود على هيئة آثار فـي الطبقة البزلتية. وعندما يصب ذلك الماء الساخن المحمل بالمعادن في ماء البحـر الجليدي، فإنه يُرسب أملاحه إلى أسفل بالجملة. ويبقى جزء من هذه الحمولة فـي القسم العلوي الحراري المائي الذي يمتد على عدة مئات من الأمتار فوق المداخن. ولأنه غني بهيدروكسيدات الحديد والمنجنيز فإن هذا القسم العلوي سـوف يتـرك جزيئاته الدقيقة في كل مكان حول الموقع.



الشكل (٤)

نموذج تكوّن الطبقات الحاوية على المعادن للرواسب الحرارية المائية لظهير شرق المحيط الهادى، باستخدام المعطيات التى تم الحصول عليها عند °21 شمالاً تبعًا لـ SCOTT (١٩٩٢) يتحول ماء البحر البارد المؤكسد والفقير جدًا بالنسبة للمعادن إلى سائل حرارى مائى ساخن، مختزل وغنى بالمعادن، بالتفاعل مع الصخور الساخنة الموجودة عند بضعة كيلومترات من الأرضية المحيطية. ويصعد السائل الحرارى المائى بسرعة ويمتزج بماء البحر المحيط ليُرسب جزءًا كبيرًا من حمولته المعدنية. وهذا الترسب نتيجة للتبريد السريع وارتفاع الرقم الهدروجينى، بزيادة كبريتات ماء البحر 109 = 1 ppb (جزء من مليار، بالجملة).

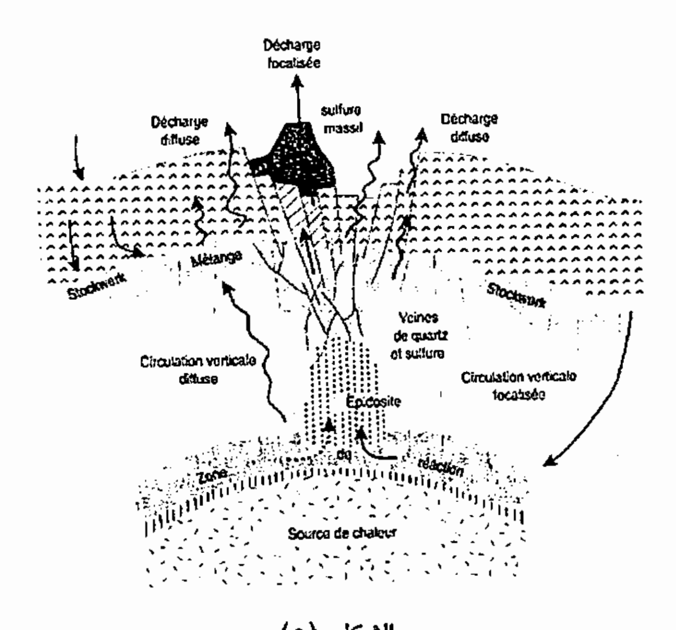
هذه المرة نعرف بشكل أفضل كثيرًا كيف استطاع العديد من الطبقات المعدنية، التى أصبحت الآن أرضية، أن تتكون فى محيطات الماضى. فإذا بدأنا بالطبقات متعددة المعادن الممزوجة بالكبريت والغنية بنحاس الأوفيوليت،[٣٩] فإن طبقات القشرة الأرضية المحيطية هذه تكون تائهة فى الحواف القارية أو فى الأقواس الجزيرية. ويحتوى الكثير من بينهما تركيزات يمكن استغلالها من النحاس الممزوج بالكبريت، والحديد والزنك، وأحيانًا مع آثار لا يمكن إهمالها من الذهب والفضة.

وتشكل هذه المواد الممزوجة بالكبريت تكدسات فى داخل أو على سطح المواد المصهورة البزلتية القديمة تحت الماء فى موجة الحمم billow - lavas، تمامًا مثل ما يحدث عند محور الظهائر الحالية. وبالإضافة إلى ذلك يمكن أن نجد فيها أجزاء دائرية من المداخن الحرارية المائية القديمة وحتى، فى بعض الحالات، بقايا أحفورية لتكوينات حرارية مائية. وتم اكتشاف مثل هذه الأنابيب المتحجرة فى ١٩٨٥ فى مواد منجم بايدا Bayda المعدنية، فى صخور أوفيوليت جبال عمان، التى تعود إلى مائة مليون سنة تقريبًا. ويذكّرنا تشكل آثار الأنابيب بشكل قاطع بمستعمرات ألفينيلا Alvinella المتكاثرة فى "الناشرات البيضاء" و"المدخنات السوداء" لظهير شرق المحيط الهادى.

والتشابهات مثل تلك التى تقتضيها الخلاصة بنفسها: تمثل هذه التكدسات الكبريتية متعددة المعادن من صخور الأوفيوليت، المعروفة والتى يتم استغلالها فى قبرص وعمان، وتركيا، وجزر نيوفاوندلاند Terre - Neuve أو فى الفلبين، الرواسب الحرارية المائية القديمة التى تكونت عن طريق المدخنات السوداء، على الظهائر المحيطية التى اختفت الآن (الشكل ٥).

---

(٣٩) أوفيوليت ophiolite: من مجموعة الصخور النارية القاعدية وفوق القاعدية تشمل البازلت والجابرو. (المترجم)



الشكل (٥)

رسم توضيحى لمنطقة تفريغ حرارية مائية فى منطقة محور ظهير محيطى، تبعًا لدراسات تم إنجازها حول عدة تجمعات لصخور أوفيوليت (عمان وقبرص ونيوفاوندلاند... إلخ).
تبعًا لـ Alt (١٩٩٥)

وتترسخ فى منطقة التجمع، صخور متحولة[٤٠] ضخمة، وهى تتكون أساسًا من الإبيدوت[٤١] والكوارتز، وتضع علامات على مناطق الصعود البؤرى للسوائل الساخنة، والتى تمر إلى أعلى عند كتل صخرية متشابكة العروق stockwerks (شبكات كثيفة من العروق الحرارية المائية المتلاحمة)، وتغذى فى السطح المدخنات السوداء التى تعتبر مستودعًا لتكدس الكبريتات متعددة المعادن فى الأرضية المحيطية.

---

(٤٠) صخور متحولة epidosites: نوع محدد من عائلة الصخور المتحولة metamorphic (بالضغط والحرارة فى القشرة الأرضية)، تتكون من الإبيدوت والكوارتز ولونها أصفر باهت أو مائل إلى الأخضر.

(٤١) الإبيدوت epidotes: معادن سليكانية بلورية يحوى معظمها الكالسيوم و/ أو الألومنيوم والحديد والمنجنيز، وهى معادن صفراء أو خضراء أو سوداء لامعة موجودة فى الصخور المتحولة. (المترجم)

الاستنتاجات

المصادر المعدنية للمحيط العميق هى الكبريتات متعددة المعادن الضخمة فى مناطق التجمع (الظهائر، وأحواض القوس الخلفى ..إلخ) وقمم البراكين تحت الماء أو جبال البحر seamounts والجزر البركانية.

والمعادن التى يحتمل الحصول عليها فى تلك الرواسب هى النحاس، والزنك، والرصاص والفضة (الممزوجة بالكبريت) فى ركام الكبريتات متعددة المعادن، والكوبلت، والنيكل، والنحاس والمنجنيز (أكاسيد/هدروكسيدات) وربما العناصر من مجموعة البلاتين (أو PGE) فى عقيدات وقشور المنجنيز. والحديد غزير فى تلك الرواسب، لكن لا قيمة تجارية له.

ودون أدنى شك سوف يبحث الإنسان عن المعادن أبعد فأبعد تحت البحر، عندما ستصبح طبقات المعادن ناضبة، كما حدث بالنسبة للهيدروكربونات. ومنذ الآن تطلب شركات تعدين يابانية وأسترالية الإذن لها بالاستكشاف فى أحواض القوس الخلفى لجنوب غرب المحيط الهادى، حيث يحتمل أن تكون غنية بالرواسب الحرارية المائية، والأكثر قربًا من القارات والأقل عمقًا من ظهائر المحيطات الأرضية الضخمة. وستظل حقول عقيدات المنجنيز التى تغطى السهول الشاسعة العميقة للمحيطات، لمدة طويلة أيضًا، غير مستغلة بسبب أعماقها السحيقة (أكثر من ٥٠٠٠ متر) وبسبب بعدها عن القارات. ومن ثم فتلك هى، حسب الأولوية، الرواسب الحرارية المائية للكبريتات متعددة المعادن الضخمة التى سيتم التنقيب عنها واستغلاليا فى الأعماق المحيطية ابتداء من القرن الواحد والعشرين. ومازال بيان محتوياتها، من الناحية الأساسية، قيد الإنجاز.

النينو، ظاهرة
صادرة عن المحيط الهادى الاستوائى[٤٢]

بقلم: جويل بيكو
Joel PICAUT

ترجمة: عزت عامر

من وجهة نظر تاريخية، تعتبر النينو ظاهرة محيطية كان الصيادون في بيرو يعرفونها منذ زمن طويل على هيئة انعكاس للتيار السطحي يظهر بالقرب من رأس السنة الميلادية، من هنا أتى اسم النينو El Nino (وهو يعنى فى الإسبانية ابن المسيح). وتبدل هذه الظاهرة المياه التى تكون عادة باردة على سواحل الإكوادور وبيرو بمياه دافئة من أصل استوائى. وكل سنتين إلى سبع سنوات، تظهر هذه التدفئة الموسمية أعلى من المعتاد. وإذا كان هذا الانحراف ذو قيمة قليلة، فإنه يسبب مزيدًا من الأمطار وتبدو النينو مفيدة لسكان تلك المناطق شبه الصحراوية. وحينما تصل الظاهرة، كما فى ١٩٩٧ - ١٩٩٨، إلى أقصى درجاتها، فإنها تسبب أمطارًا قد تصل إلى ثلاثين مرة ضعف الأمطار العادية. ومع سيول الطين التى تكتسح القرى، وانهيار السدود، وخسائر الأرواح البشرية، تظهر النينو عندئذ ككارثة كبرى.

وبهدف تعيين الجانب الشاذ لهذه الظاهرة، من الشائع تمثيل البارمترات الجوية والخاصة بعلم المحيطات التى تميز هذه الظاهرة، بمصطلحات انحرافات بالنسبة لدورة موسمية متوسطة. ويمثل الجزء العلوى فى الشكل ١ الشذوذات الدافئة، النينو El Nino، والأحداث عند درجات الحرارة الباردة، التى يطلق عليها النينا La Nina على العكس.

---

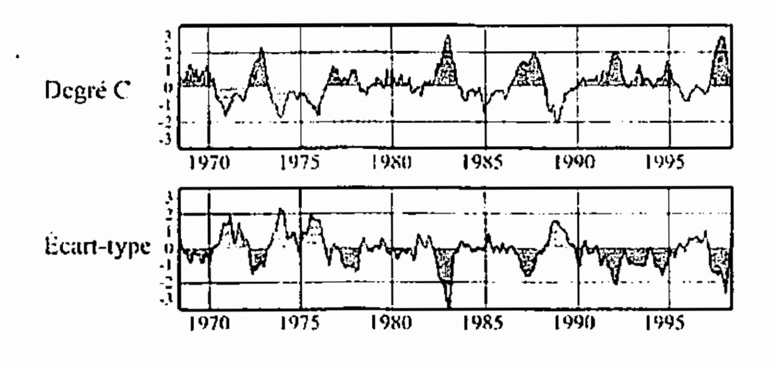
(٤٢) نص المحاضرة رقم ٢٠٤ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٢ يوليو ٢٠٠٠.

وتكون هذه التغيرات فى درجة حرارة سطح البحر متماثلة جدًا لتلك التى تُسجل على شواطئ الإكوادور وبيرو، وما اكتشفه كذلك علماء المحيطات من أن النينو لا يقتصر على تلك الشواطئ لكنه يغطى مجمل المنطقة الاستوائية من المحيط الهادى. وفى الواقع فإن منظومة التذبذبات هذه النينو والنينا تتعلق أيضًا بالجو نظرًا لوجود تذبذب للضغط الجوى، يطلق عليه "التذبذب الجنوبى oscillation australe". ولقد اكتشف هذا التذبذب الجوى جلبرت ووكر Gilbert Wolker، مدير مراصد الهند بين عامى ١٩٠٤ و١٩٢٠. ويقع هذا التذبذب بين مركز الضغط المرتفع، الموجود بين تاهيتى وجزيرة الباك،[٤٣] ويقع مركز الضغط المنخفض شمال أستراليا. وعندما يزداد الضغط عند تاهيتى، فإنه ينخفض فى داروين والعكس بالعكس. ويؤدى ذلك إلى تعيين قيمة التذبذب الجنوبى، الذى يطلق عليه SOI أى فهرس التذبذب الجنوبى Southern Oscillation Index. وهذه الاختلافات فى مجالات الضغط تجعل الرياح متقلبة. وتتضاءل الصابيات[٤٤] على طول خط الاستواء عندما تكون الضغوط عند تاهيتى أقل منها عند داروين وتزداد فى الحالة العكسية. والتناقض الفائق فى الطور بين SOI وتغيرات درجة حرارة سطح المحيط الهادى الاستوائى (الشكل ١) يشير إلى وجود تقارن بين المحيط والجو على مستوى حوض المحيط الهادى الاستوائى.

---

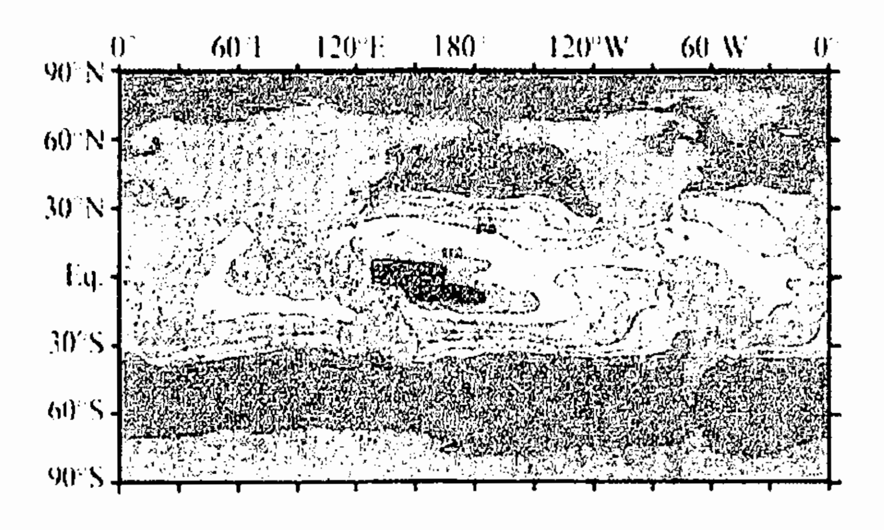
(٤٣) جزيرة الباك Ile de Paques: فى المحيط الهادى غرب شيلى. (المترجم)

(٤٤) الصّابيات Les alizes: رياح تهب من الشمال الشرقى إلى الجنوب الغربى. (المترجم)



الشكل (١)

العلوى: شذوذات درجة حرارة سطح البحر في منطقة المحيط الهادى تقع بين 5ْ شمالاً و 5ْ جنوبا بين 170ْ غربا و 120ْ غربا. السفلى: نمط التباعد لاختلافات الضغط الجوى بين تاهيتى وداروين (دليل التذبذب الجنوبى).



الشكل (٢)

متوسط درجة حرارة سطح البحر على مستوى كوكبنا

وفى الشكل ٢ تمثيل لدرجات الحرارة المتوسطة لسطح البحر على مجمل كوكبنا الأرضى (علم المناخ خلال ما يقرب من قرن من القياسات). ومع أقصى إشماس خاص بالمناطق الاستوائية، من المنطقى أن نجد فيها درجات حرارة سطح البحر الأكثر ارتفاعًا. لكن الأكثر إثارة للاهتمام، هو وجود منطقة تكون فيها درجات حرارة سطح البحر أعلى دائمًا من ٢٨ درجة مئوية. إنها منطقة تغطى كل المحيط الهادى الاستوائى وهو يفيض بوفرة فى المحيط الهندى، مع درجة قصوى تتخطى كثيرًا درجات الحرارة ٢٩ درجة مئوية فى الجزء الواقع تجاه شواطئ الفلبين وشواطئ ببوا غينية الجديدة. وبالنسبة لمساحة أكبر من مساحة أوروبا، يشكّل هذا الحد الأقصى لدرجة الحرارة على عمق يصل إلى نحو مائة متر، الخزان الأولى لحرارة منظومة ديناميكية حرارية لكوكبنا الأرضى. وفى الواقع فإن تلك "الغلاية bouilloire" تصرف على الدوام حرارة خط الاستواء نحو القطبين بواسطة التيارات المحيطية وبواسطة الجو. وهكذا حدث أن هذا الخزان الدافئ شهد اضطرابًا فى درجة الحرارة أو فى الموقع الجغرافى وأن مناخ كوكبنا هو الذى تأثر تمامًا بسبب ذلك. ويعتبر النينو والنينا فى الواقع السببين الرئيسيين لاضطراب خزان الماء الدافئ هذا ومن ثم اضطراب المناخ العالمى على المقاييس الزمنية التى تتراوح بين موسم وبضع سنوات.

ويوضح الشكل ٣ بشكل تخطيطى فى الأبعاد الثلاثة الأحوال الجوية والمحيط السطحى خلال أطوار النينو والنينا وما بينهما فى المحيط الهادى الاستوائى. على يمين هذا الشكل نلاحظ شواطئ كاليفورنيا وأمريكا الجنوبية وعلى الشمال طرف أستراليا. وطبقة التدرج الحرارى الأقصى[٤٥] هى الفاصل بين المياه الساخنة والسطح (درجات حرارة أعلى من ٢٠ درجة مئوية) والمياه الباردة (درجات حرارة من ١٠ إلى صفر درجة مئوية) والتى تمتد حتى عمق المحيط. وفى الأحوال

(٤٥)طبقة التدرج الحرارى الأقصى thermocline: على عمق يتراوح بين ١ و٣ كيلومترات فى مياه البحر. (المترجم)

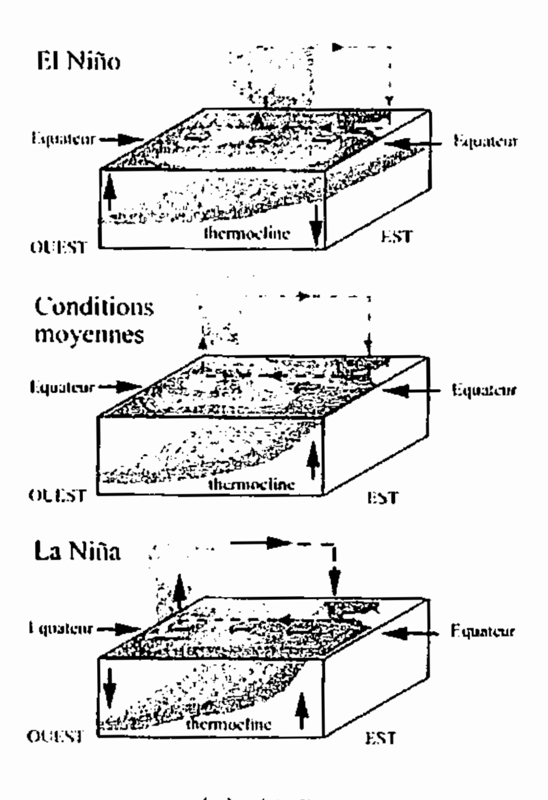
المتوسطة أو المتوسطات (وسط الشكل ٣) تكون تلك الطبقة قريبة جدًا من السطح في المنطقة الشرقية للحوض الاستوائي وتصل إلى ١٥٠ مترًا في الغرب، مقر المياه الدافئة. وعلى سطح هذا الخزان يكون التبخر في أقصى درجاته. ويؤدي ذلك إلى حركة حمل حراري صاعدة مهمة التي تكثف، على الارتفاعات فوق سطح البحر، الرطوبة على هيئة أمطار شديدة. وعلى سبيل المثال، في البلاد القريبة من خزان المياه الدافئة، تسقط الأمطار أكثر، من ثلاث إلى سبع مرات، منها في بريطانيا أو نورماندي. وتلك الحركة الصاعدة، المتخلصة من رطوبتها، تستمر في الطبقة السفلى من الغلاف الجوي بواسطة حركة نحو الشرق تأتي، بالهبوط، بهواء جاف على الشواطئ الشرقية للمحيط الهادي الاستوائي. وتتشابك تلك التحركات الجوية في مجملها مع الصابيات الشمالية الشرقية والجنوبية الشرقية التي تصل إلى خزان المياه الدافئة. وتشكّل هذه المجموعة الخلية الجوية لووكر، تكريمًا لمكتشف التذبذب الجنوبي؛ لذلك فإن سطح المحيط الهادي الاستوائي معرض في المتوسط لرياح من الشرق، تسبب تلك تيارًا سطحيًا في اتجاه الغرب، يطلق عليه التيار الاستوائي الجنوبي. وتحرف ظاهرة كوريوليس،[٤٦] المرتبطة بدوران الأرض، هذا التيار نحو الشمال في نصف الكرة ذي نفس الاسم ونحو الجنوب في الجانب الآخر من خط الاستواء. وينتج عن ذلك، على السطح وعند خط الاستواء بالضبط، اختلافًا سيتم معادلته بوصول الماء البارد من تحت السطح. وهذه هي ظاهرة الاندفاع المُسَاطح[٤٧] الاستوائي، وهو مشابه جدًا في أساسه للاندفاعات المساطحة الساحلية لمعظم الشواطئ الغربية للمناطق الاستوائية (كاليفورنيا، بيرو، شيلي، موريتانيا، ناميبيا....). ويتم نقل المياه التي بردت بواسطة الاندفاع المساطح الاستوائي نحو الغرب بواسطة التيار الاستوائي الجنوبي. وخلال مسار تلك المياه يتم تسخينها بواسطة الإشماس الأقصى. وتجمع الصابات المياه الدافئة في الجزء

---

(٤٦) ظاهرة كوريوليس Coriolis: ناتجة عن قوة كوريوليس، الناشئة عن دوران الأرض المحوري (وهي تزيح مسار الأجسام يمينًا في نصف الكرة الشمالي والعكس جنوبًا). (المترجم)

(٤٧) الاندفاع المُساطح upwelling: حركة كتل المياه المحيطية الباردة باتجاه السطح. (المترجم)

الغربى من المحيط الهادى الاستوائى، وهكذا يتكون خزان المياه الدافئــة. وبعكــس الاندفاع المساطح الاستوائى الذى يسبب ظهور طبقة التدرج الحرارى الأقصى فــى الجزء الشرقى من الحوض، فإن هذا التجميع للمياه الدافئة ينتهى إلى طبقــة تــدرج حرارى أقصى أكثر عمقًا بكثير فى الجزء الغربى. وتنتهى الميــاه الدافئــة والميــاه الباردة، على التوالى، إلى تمدد وتقلص كتل مياه، وتتم بتغيــرات ملحوظــة علــى مستوى البحر فى تلك المناطق. وهكذا يوجد اختلاف يقترب من متر بين المــستوى المتوسط للبحر تجاه شواطئ الفلبين وشواطئ جزر جالاباجوس.



الشكل (٣)
التفاعل بين المحيط الهادى الاستوائى والجو خلال أحوال النينو (أعلى)،
والمتوسطات (فى الوسط) والنينا (أسفل)

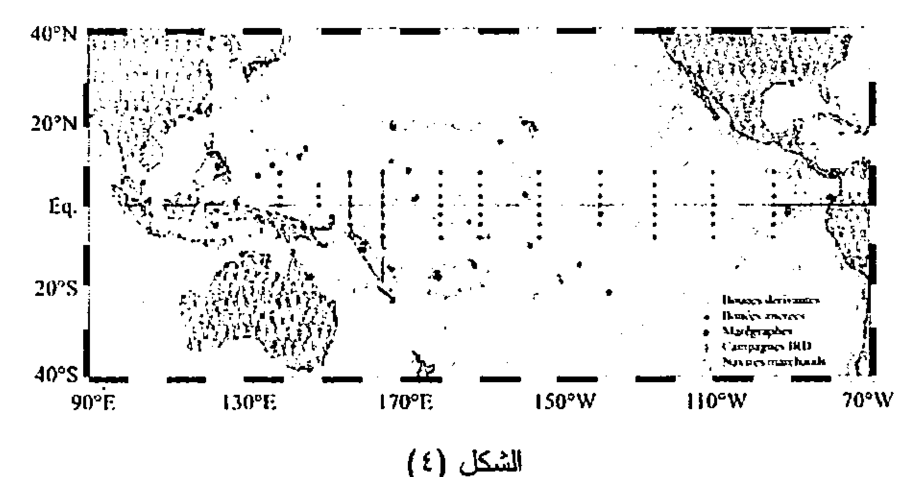
وأثناء النينو (الأعلى فى الشكل ٣)، تضعف الصّابات، وقد تنعكس. ولا تتم المحافظة بعد ذلك على خزان المياه الدافئة بواسطة الصّابات. وتفيض المياه الساخنة نحو شرق الحوض، وتتزحزح معها مناطق الحمل الجوى. وكذلك يسقط المطر أقل بكثير على إندونيسيا وأكثر بكثير على جزر جالاباجوس. أما بخصوص طبقة التدرج الحرارى الأقصى فإنها تدور على عقبيها حيث إن كتل الماء السطحية تصب من الغرب نحو شرق الحوض الاستوائى. والفائدة العلمية العظيمة لظاهرة النينو أنها تكشف طابع التقارن بين المحيط الاستوائى والجو. وكان جاكوب جركنز Jacob Bjerknes هو الذى لفت الأنظار فى الستينيات إلى خلية ووكر والذى أوضح التقارن بين درجات حرارة سطح البحر فى المحيط الهادى الاستوائى والتذبذب الجنوبى (الشكل ١). ومن وجهة نظر علم المحيطات فإن الصّابات هى التى تولد التيارات ومن ثم الاختلاف المهم فى درجة حرارة سطح البحر بين طرفى الحوض (من ٥ درجات مئوية إلى ١٠ درجات مئوية). ومن وجهة النظر الجوية، فإنه ذلك الاختلاف فى درجة حرارة سطح البحر هو الذى يُحدث تغيرات الضغط الجوى ومن ثم الصّابات. وهكذا نجد أنفسنا من جديد أمام مشكلة "ما الذى يُحدث الآخر" البيضة أم الدجاجة. وبسبب طابعها الاضطرابى والفوضوى فإن التحركات الجوية لديها ذاكرة ضعيفة، بقيمة تصل إلى نحو عشرة أيام. وبالعكس فإن المحيط الاستوائى السطحى لديه ذاكرة تصل إلى عدة سنوات مع قدرة حرارية أكبر نحو ألف مرة من نظيرتها لدى الجو وبنقل بطىء نسبيًا لكتل الماء الهائلة خلال عدة آلاف من الكيلومترات. ومن ثم فإن المحيط الهادى الاستوائى هو ذاكرة التغيرات من نوع ظاهرة النينو أو لنقيضها النينا. وفى الأصل، كانت ظاهرة النينو تُعتبر كظاهرة محيطية ليس إلا. وفى الواقع فإن النينو والنينا هما ظاهرتان تزاوجان بين الطبقات السطحية للمحيط الهادى الاستوائى والذبذات الجنوبية، ومن هنا تسميتهما الحديثة بـ ENSO أى El Nino Southern Oscillation، مع وجود طور ساخن هو النينو وطور بارد هو النينا.

ويمكن اعتبار النينا إبراز للأحوال الانتقالية أو المتوسطة (أسفل الشكل ٣). وتهب الصبّابات أكثر قوة من الرياح العادية، ويكون الاندفاع المُسَاطح الاستوائى فى حالته القصوى مع طبقة تدرج حرارى أقصى تلامس السطح. وفى الجانب الآخر من الحوض، يتم دفع خزان المياه الساخنة أيضًا أكثر نحو شواطئ الفلبين، مع طبقة تدرج حرارى أقصى يمكن أن يصل عمقها إلى ٢٠٠ متر. عندئذ تتدفق منطقة الحمل الجوى المشاركة على إندونيسيا. وتسقط أمطار أكثر أيضًا فى تلك المنطقة وتكون أقل أيضًا فى شرق المحيط الهادى.

وعقب اكتشاف التزاوج المحيط – الجو بواسطة جركنز، بدأت ظاهرة النينو ونقيضها النينا تؤلف بين جماعتى علماء المحيط وعلماء الجو. لكن كان من الواجب الوصول غير المتوقع للنينو فى ١٩٨٢ – ١٩٨٣ (فى العصر البالغ قرنًا) مع سلسلة الكوارث التى صاحبته، حتى يتم التحقق من أن آليات هذه المنظومة المزدوجة كانت لا تزال بعيدة عن أن تكون مفهومة. وفى ١٩٨٥، تم إطلاق برنامج دولى لعشر سنوات، أُطلق عليه TOGA أى المحيط الاستوائى والجو العالمىTropical Ocean and Global Atmosphere. وكان هذا البرنامج يهدف إلى وصف أفضل للتزاوج بين المحيط الاستوائى والجو العالمى، حتى يمكن تحديد فى أية مقاييس يمكن لهذه المنظومة المزدوجة أن تكون قابلة للتنبؤ على مستويات زمن يتراوح بين بضعة أشهر وبضع سنوات. ولهذا الغرض كان من الواجب تطوير مجموعة نماذج رقمية للمحيط وللجو والمزاوجة بينها. وكان يجب بالأخص إعداد منظومة رصد فى الموضع الأصلى، مع نقل المعطيات فى الزمن الفعلى. ويتم تقديم العناصر الأساسية للأرصاد المحيطية لهذا البرنامج فى الشكل ٤. وأُلقى العديد من العوامات المنحرفة عن السطح لتعطى درجات حرارة وتيارات السطح، بفضل منظومة تحديد الوضع وجمع المعطيات ARGOS. وتم توفير أجهزة قياس المد والجزر maregraphes الموجودة فى جزر المحيط الهادى بواسطة منظومات ARGOS، وتستكمل بواسطة أجهزة قياس المد والجزر الإضافية. وجُهزت سفن تجارية بمسابر حرارية منفصلة، تقيس خلال الإبحار مقطع درجة حرارة السطح

حتى عمق ٧٠٠ متر. وكان لب شبكة الأرصاد المحيطية هذه هو الإعداد التدريجي لعدد ٧٠ عوامة وزنها طن، ملقى بها كمرساة على عمق يتراوح بين ٣٠٠٠ إلى ٥٠٠٠ متر، في إطار تعاون بين الولايات المتحدة، وفرنسا، واليابان، وتايوان وكوريا الجنوبية. وتقيس تلك العوامات الرياح، ودرجة حرارة الهواء، ودرجة حرارة البحر بين عمقي صفر و٥٠٠ متر. وبالتوازي تم إنجاز العديد من حملات دراسة المحيط. وأتمّ مختبرو الخاص بعلم المحيط الفيزيائي التابع لمركز IRD في نوميه Noumea، وحده، خلال حملات TOGA, 21 مع سفن أبحاث الأسطول الدولي، ما يصل مجمله إلى ٢٣ شهرًا في البحر.

وتلك القياسات في موضعها الأصلي، والتي نُقلت في الوقت الفعلي أو التغيرات بالغة السرعة في قلب جماعتنا العلمية الدولية، تم استكمالها بقياسات بالأقمار الصناعية (درجة حرارة السطح، الإشعاع، الرياح...). وفي أغسطس ١٩٩٢ تم إطلاق قمر صناعي فرنسي أمريكي توبيكس بوسيدون TOPEX/Poseidon، في تعاون نموذجي بين وكالة الفضاء الأوروبية CNES ووكالة الفضاء الأمريكية NASA. وثبت أن هذا القمر الصناعي، الذي يطير على ارتفاع ١٣٠٠ كم بسرعة تتبُع على الأرض ٥ كم/ثانية، قادر على أن يقيس، بعد عدة تصحيحات، متوسطات اختلاف المستويات لسطح البحر بدقة تصل إلى ٢ سنتيمتر. فإذا عرفنا أن شذوذات المياه الدافئة خلال النينو تنتهي إلى زيادة مستوى البحر تصل إلى ٣٠ سنتيمتر، اتضح أن هذا القمر الصناعي كان أداة مدهشة لدراسة هذه الظاهرة. ويبرر ذلك جزئيًا إطالة هذا النوع من القياس بسلسلة الأقمار الصناعية الفرنسية الأمريكية جاسون Jason، التي يُتوقع إطلاق أولها في ٢٠٠١.



الشكل (٤)

شبكة الأرصاد المحيطية مجهزة فى المحيط الهادى

فى نهاية البرنامج الدولى TOGA فى ١٩٩٤.

وانتهى البرنامج TOGA رسميًا فى نهاية ١٩٩٤. وأيضًا تعتبر إشكالية النينو مثيرة للاهتمام دائمًا، لكنها تجاوزت إطارها بدراسة هذه التغيرات على مدى أطول (١٠ سنوات، كما سنرى فيما بعد). ويتم حاليًا متابعة هذه الأبحاث فى إطار البرنامج الدولى CLIVAR تقلبية المناخ وإمكانية التنبؤ به Climate Variability and predictability. وهذا البرنامج الأكثر عمومية، الذى يهدف إلى فهم تقلبية المناخ لكوكبنا فى مجمله على مستويات زمنية تتراوح بين موسم وعدة مئات السنوات، يمتد من ١٩٩٥ إلى ٢٠١٠.

وأثبتت الأبحاث حول التغيرات طويلة المدى للنينو جدواها بحدوث النينو الثانى للقرن فى ١٩٩٧. وتنبأت نماذج ديناميكية تزاوج بين المحيط والجو، وبضعة نماذج إحصائية، بشكل جيد بحدث جديد منذ نوفمبر ١٩٩٦. ولسوء الحظ كانت هذه النماذج عاجزة عن التنبؤ بالشدة الضخمة جدًا لهذا الحدث قبل التمكن من اكتشاف العناصر الأولى للظاهرة فى ربيع ١٩٩٧ بشبكة الأرصاد فى الموضع الأصلى وبالأقمار الصناعية. وبشكل خاص أتاحت العوامات الملقاة والقمر

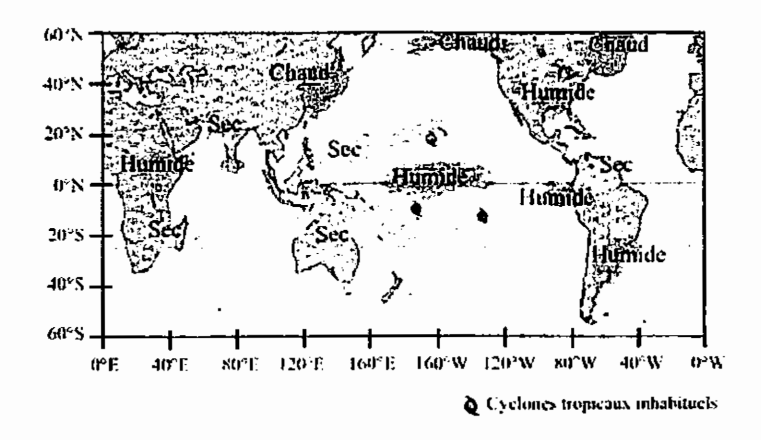
الصناعى TOPEX/Poseidon الكشف والتتبع بالتفصيل للإشارة المنبئة بالنينو الذى حدث فى ١٩٩٧، ولّدت عصفة الريح الغربية الشديدة الناتجة عن المحيط الهندى تيارًا سطحيًا قويًا نحو الشرق. وبدأ هذا التيار فى زحزحة خزان المياه الدافئة نحو الشرق. وبعكس الصبّابات، رياح الشرق التى تولّد الاندفاع المُسَاطح الاستوائى، أحدثت عصفة الريح هذه بداية سريعة لطبقة التدرج الحرارى الأقصى، التى يطلق عليها اندفاع إلى الأعماق downwelling. وبانعكاس قوة كوريوليس لجانبى خط الاستواء، أُحتبست إشارة الاندفاع إلى الأعماق هذه بطول خط الاستواء وانتشرت على هيئة موجة استوائية، يطلق عليها موجة كلفن Kelvin وتكون نحو ٢٠٠ كم يوميًا. وفى شهرين، وصلت إشارة الاندفاع إلى الأعماق هذه إلى الجزء الشرقى من حوض المحيط الهادى الاستوائى، وأوقفت الاندفاع المُسَاطح المحلى ونتج عن ذلك حث للسخونة. وعندما وصلت هذه الموجة على شواطئ خط الاستواء انعكست على هيئة موجات كلفن منتشرة نحو الشمال والجنوب. وأوقفت الموجات الشاطئية المندفعة إلى الأعماق، بدورها، الاندفاعات المُسَاطحة المحلية وحملت مياهًا دافئة بطول شواطئ كاليفورنيا على المحيط الأطلنطى الجنوبى. ومنذ يونيو ١٩٩٧، أزيح خزان المياه الدافئة لأكثر من ٥٠٠٠ كم. ولحق بالسخونة فى الشرق، وفى نهاية عام ١٩٩٧ كان كل الشريط الاستوائى للمحيط الهادى مغطى بمياه أعلى من ٢٩ درجة مئوية. وتحدث موجات كلفن المندفعة إلى الأعماق مع كل حدوث للنينو وتشارك فى نمو الظاهرة بطريقة الإزاحة نفسها نحو الشرق لخزان المياه الدافئة. لكنه الطابع الاستثنائى لإشارة مارس ١٩٩٧، بالإزاحة الشديدة لخزان المياه الدافئة نحو الشرق وبتوليد موجة كلفن قوية للاندفاع إلى الأعماق، هو الذى يمكن أن يكون قد ساعد إلى حد بعيد فى جعل هذا النينو، الند إن لم يكن الأعلى من النينو فى ١٩٨٢ - ١٩٨٣.

ونظرًا لنقص المعطيات العلمية والاجتماعية الاقتصادية الدقيقة على مستوى العالم، فإنه من المستحيل أن نعيّن بدقة النتائج المخربة (ولكن أيضًا المفيدة) للنينو فى ١٩٩٧ - ١٩٩٨. وفضلاً عن ذلك فإن فرط توسط هذا الحدث كان وراء كل

مجموعة التقارير غير العلمية، حيث أصبح النينو مسئولا عن كل ما كان غير عادى فى العالم فى ١٩٩٧ و١٩٩٨. ولنذكر ببضعة أمثلة أن النيونو لم يكن دائمًا مرادفًا للكوارث. فلقد زاد تصدير جمبرى التربية بواسطة إكوادور بنسبة ٤٠ فى المائة فى ١٩٩٧، وانخفض كثيرًا النشاط الإعصارى فى الكريبى والشاطئ الشرقى للولايات المتحدة الأمريكية فى ١٩٩٧، وكانت فواتير التدفئة فى شمال الولايات المتحدة وفى جزء من كندا ضئيلة فى شتاء ١٩٩٧. وعلى أساس تقرير للمنظمة الدولية للأحوال الجوية، يمكن كذلك اختصار النتائج المخربة لهذه الظاهرة. وقد يفقد أكثر من ٢٤٠٠٠ شخص حياتهم بسبب العواصف والفيضانات. وقد يتأثر أكثر من ١١٠ مليون شخص بهذا النينو، منهم ستة ملايين يضطرون لترك أماكن سكنهم. وقد يتخطى التقدير غير المتقن لتكاليف الخسائر ٤٠ مليار يورو. ولقد تسببت فيضانات متكررة فى المناطق كثيرة فى العالم فى خسائر فادحة فى المجال الزراعى. وحدث التأثير السلبى على الزراعة فى مناطق أخرى مع ظهور ظواهر جفاف ذات شأن، والتى أدت بالإضافة إلى ذلك إلى مشاكل خطيرة فى الإمداد بالماء الصالح للشرب. وبسبب ظواهر الجفاف اشتدت حرائق الأدغال والغابات كثيرًا فى المناطق الإندونيسية والأمازونية.

وقادت هذه التغيرات المناخية والبشرية إلى تلوث الماء الصالح للشرب وأوجدت شروطًا مناسبة لتطور أمراض مثل الملاريا وحمى الضنك. والأجدر بالملاحظة التفاوت فى الخسائر بين البلدان الصناعية والبلدان النامية. وتقع هذه الأخيرة بشكل رئيسى فى الحزام الاستوائى حيث تكون تأثيرات النينو أشد وطأة. لكن القابلية للإصابات البشرية فى تلك البلدان لا يمت بصلة لنظيرتها فى البلدان الصناعية. وعلى سبيل المثال فإن الخسارة فى الأرواح البشرية فى الولايات المتحدة قد ترتفع إلى ٥٦٠ شخصا بينما يتجاوز الإجمالى فى إفريقيا ١٣٠٠٠ شخص. وبالعكس فإن التكلفة الاقتصادية قد تصل إلى ٥ مليارات يورو بالنسبة للولايات المتحدة مقابل ٠,١ مليار بالنسبة لإفريقيا. وبالتأكيد ليست تكاليف كوخ هى نفسها تكاليف منزل مكيّف الهواء.

ولكى نفهم بشكل أفضل قليلاً كيفية تأثير هذه الظاهرة على منـــاخ كوكبنـــا، استرجَع الشكل ٥ المناطق الرئيسية للأمطار ودرجات حـــرارة الهـــواء الـــشاذة، مستخلصة من إحصائيات عن النينو منذ ١٩٠٠. وبالطبع فـــإن ظـــاهرتى النينـــو ١٩٨٢ - ١٩٨٣ و١٩٩٧ - ١٩٩٨ يفوقان كثيرًا هذا الإطـــار. وعلـــى مـــستوى حوض المحيط الهادى الاستوائى لاحظنا سابقًا أن مناطق الحمل الجـــوى، ومعهـــا الأمطار، تتزحزح نحو المركز ونحو شرق المحيط الهادى. وعندئذ يتـــأثر شـــمال أستراليا، وكذلك الفلبين، وماليزيا وإندونيسيا، بظواهر الجفاف. ويتعلـــق اخـــتلال دورة الهواء بكل الحزام المدارى. ويتم الشعور به خاصة فـــى شـــمال البرازيـــل، والأرجنتين، وإفريقيا الشرقية والجنوبية، والهند. ويتيح الكثير مـــن ســـيور نقـــل الحركة للنينو أن يؤثر فى المناطق المعتدلة. ويعتمد الجانب الأصلى على سلـــسلة دُفعات الموجات الجوية، الآتية من المناطق ذات الشذوذ فى السخونة فـــى مركـــز المحيط الهادى الاستوائى من فوق القطب الشمالى. وهذه السلسة مـــن الموجـــات الموجودة فى أعلى الطبقة السفلى من الغلاف الجوى، تحدث اخـــتلالاً فـــى منـــاخ أمريكا الشمالية وكندا، وأوروبا بصورة استثنائية.



الشكل (٥)

التأثيرات الجوية لظاهرة نينو متوسطة على مستوى كوكبنا.
مع تقريب جيد كافٍ، ينعكس التأثير خلال النينو.

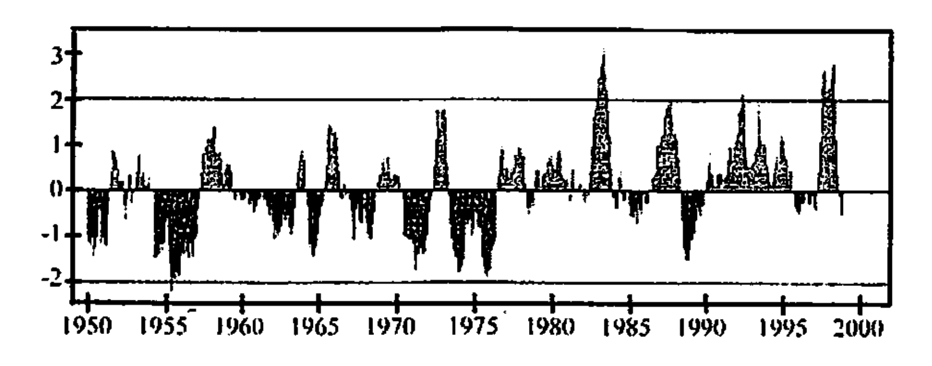
وينجذب التيار النفاث[٤٨] نحو خط الاستواء، مما يتيح لعواصف الشتاء الشمالية أن تصل إلى كاليفورنيا، وتوقف هبوب الأعاصير على الكاريبى والشاطئ الشرقى للولايات المتحدة. وفى المحيط الهادى، تتواجد مناطق تكوّن الأعاصير، هى أيضًا، مزحزحة مع خزان المياه الدافئة. وفى الواقع فإن الشرط الضرورى (لكنه غير الكافى) لتكوين إعصار أن تساوى درجة حرارة سطح البحر على الأقل ٢٨ درجة مئوية. وعند حدوث ظواهر نينو خطيرة، يمكن أن تصل أعاصير المحيط الهادى الغربى إلى هاواى والبولينيز Polynesie الفرنسية. وليس أمام السائح الفرنسى الذى تقلقه مواسم الأعاصير إلا أن يحفظ فى ذاكرته أنه خلال النينو تكون المارتنيك والجوديلوب[٤٩] شبه مصانتين، بينما تكون هناك مخاطرة فى البولينيز الفرنسية. وتنعكس الإحصاءات خلال النينو.

ويوضح المثال السابق أهمية القدرة على التنبؤ بالنينو أو النينا وقوتيهما بطريقة يمكن التعويل عليها عدة أشهر مسبقًا. وتتنافس الخدمات الجوية فى التنبؤ لأزمنة قصيرة المدى، وليست ملائمة حقًا للتنبؤ بالشذوذات الجوية لستة أشهر مسبقًا. ومجتمعنا لديه الكثير ليفعله فى مجال جنى الأرباح. فقد أتاحت التجارب الأولى لتطبيق التنبؤ لدولة كيرا Ceara، فى شمال شرق البرازيل، بأن لا تفقد سوى ١٠ فى المائة من إنتاجها الزراعى خلال ظاهرة النينو فى ١٩٩١ - ١٩٩٢ على أثر الجفاف. وللمقارنة كانت تلك المنطقة نفسها قد فقدت ٧٥ فى المائة من إنتاجها الزراعى عند حدوث النينو فى ١٩٨٦ - ١٩٨٧. لكن سكان تلك الدولة يحتفظون أيضًا بذكرى التنبؤ الردىء بنينو ١٩٩٣ - ١٩٩٤. أما بخصوص نينو ١٩٩٧ - ١٩٩٨، فإنه لم يكن قد سبق التنبؤ بقوته غير العادية، حيث لم يكن قد تم من قبل إدخال تأثير هبة ريح مارس ١٩٩٧ فى نماذج التنبؤ. والشاغل الرئيسى لمجتمعنا العلمى الزيادة فى تواتر وشدة ظواهر النينو منذ ٢٠ - ٣٠ سنة. ويمثل

(٤٨) تيار نفاث jet stream: تيار هوائى جيوستورفى (منحرف بدوران الأرض) ضيق فائق السرعة ضمن الرياح الغربية (العكسية) العليا. (المترجم)

(٤٩) المارتنيك Martinique وجوديلوب Guadelouope: من جزر الأنتيل الصغرى. (المترجم)

الشكل ٦ المسرد متعدد الاختلافات multivarie لنينو التذبذب الجنــوبى ENSO، الذى يدمج تغيرات الضغط الجوى، ومكونات الريح، ودرجات حرارة سطح البحر والغطاء الغائم فوق المحيط الهادى الاستوائى منذ ١٩٥٠. ويشير مسرد التذبــذب الجنوبى الذى تم قياسه منذ ١٨٨٢ إلى تكرار منتظم تقريبًا (كل أربع إلـــى ســبع سنوات) لظاهرتى النينو والنينا. ويقدم الشكل ٦ تغيرًا فى الاتجاه منذ ١٩٧٦، مــع ظواهر نينو أكثر قوة وأكثر تقاربًا. وبالتوازى مع هذه التغيرات، فإن قياس خـــزان المياه الدافئة اتسع منذ ٢٠ - ٣٠ سنة. ومجرد وجود خطأ قياس مؤكد على المدى البعيد، يجعل من الصعب أن تعرف ما إذا كانت هذه الزيادات ليست سوى انعكاس لتغير طبيعى فى نينو التذبذب الجنوبى ENSO أو انعكاس لتغير ناتج عن ســخونة إجمالية. وتحاول أجهزة عمل النماذج أن تحاكى تغيرات النينـــو والنينـــا بواســطة تغيرات فى مقدار غاز تحدث له ظاهرة احتباس حرارى. ويقيس باحثون آخـــرون نمو الأشجار والمرجانيات عدة مرات كل مائة عام لإنشاء سلاسل مرتبـــة زمنيًـــا للماضى. فإذا وُجد فى هذه السلاسل تغيرات سريعة فى تواتر وشدة نينو التذبــذب الجنوبى، يمكن أن تكون التغيرات الراهنة طبيعية.



الشكل (٦)

مسرد متعدد الاختلاف للنينو والنينا من ١٩٥٠ إلى ١٩٩٨

(المصدر NOAA)

وحيث إن المحيط الهادى الاستوائى هو موطن أكثر خزانات الحرارة ضخامة فى كوكبنا، فإن هذا المحيط هو مصدر مهم جدًا للاختلالات المناخية متعددة السنوات pluriannuels، والمعروفة فى الوقت الراهن باسم ظاهرتى النينو والنينا. وكان البرنامج الدولى TOGA نجاحًا علميًا كبيرًا مع إثبات أنه، للمرة الأولى فى تاريخ البشرية، كان من الممكن التنبؤ، ستة أشهر فى العام بشكل مسبق، بحدوث بعض من هذه الاختلالات المناخية. وقد يكون على إعداد وتطوير شبكات الرصد المحيطى العملياتية فى موضعها الأصلى وعلى الأقمار الصناعية وعلى تمثيل تلك الأرصاد فى نماذج رقمية، أن تقوم بتحسين التنبؤات. ومن ثم يجب على مجتمعنا أن يصبح قادرًا على استباق والإقلال من التأثير الضار للاختلالات المناخية، إذا حصل على الوسائل الكفيلة بذلك. ويبقى أن هذا المجتمع نفسه قد يكون السبب فى زيادة تواتر وشدة النينو.

المراجع:

- Anonyme, *The 1997-1998 El Niño Event : A Scientific and Technical Retrospective*, Genève, Organisation mondiale de la météorologie, 1999, 96 p.
- Glantz (M. H.), *Currents of Change, El Niño Impact on Climate and Society*, Cambridge University Press, 1996, 194 p.
- Philander (S. G.), *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*, San Diego, Academic Press, 1990, 293 p.
- Voituriez (B.) et Jacques (G.), *El Niño, Réalités et fiction*, Paris, Éditions UNESCO, 1999, 116 p.

تأثير الإنسان على المناخ[٥٠]

بقلم: هيرفيه لو ترو

Hervé Le TREUT

ترجمة: عزت عامر

أصبحت مخاطر تعديلات مناخ كوكب الأرض بـإطلاق الغـاز المـسبب لظاهرة الاحتباس الحرارى معروفة بشكل جيد. والقياسات الضرورية لمواجهة هذه المشكلة ذات أهمية بالغة، وتتضمن خيارات مهمة، فى النطـاق الطـاقى أو فـى منظومة النقل مثلاً. ولا يستطيع العلم وحده أن يعين فى الاختيار بين تلك الخيارات المختلفة، ويجب حسمها على المستوى السياسى وعلى مستوى المواطن. ومن ثـم فمن المهم أن يستطيع جمهور واسع فهم ليس فقط حقيقة خطر التغييـر المنـاخى، ولكن أيضا، وربما بشكل خاص، أن يستطيع تكوين فكرة مناسبة بقـدر مـا هـى ممكنة عن الأمور المؤكدة أو غير المؤكدة التى تحيط بهذه المشكلة.

تعديلات التركيب الكيميائى للجو

يبدأ الأمر كله باكتشاف لا يعانى من أى لبس: منذ بداية العصر الـصناعى تعرض التركيب الكيميائى للكوكب إلى تطور عنيف، غير مسبوق خلال الألف سنة الأخيرة.

وتم التوصل إلى هذا الاكتشاف بقياسات تم إجراؤها سيان فى فقاعات الهواء التى احتبستها المجمدات،[٥١] فيما يتعلق بأحوال المناخ القديمـة، أو بـشكل أكثـر

---

(٥٠)نص المحاضرة رقم ٢٠٥ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٣ يوليو ٢٠٠٠.

(٥١)المجمّدة glacier: جمد متراكب عظيم يتكون فى الجبال العالية الباردة وفى المنـاطق القطبيـة. نهـر جليدى، مثلّجة. (المترجم)

مباشرة انطلاقًا من شبكة كوكبية تم التوصل إلى تجهيزها لهــذا الغــرض خــلال العقود الأخيرة. ونسبة ثانى أكسيد الكربون، التى تراوحت قيمتها خلال ٤٠٠٠٠٠ ألف سنة الأخيرة بين ١٨٠ و٢٨٠ أجزاء من المليون، تجاوزت فجأة ٣٦٠ جــزء من المليون. وتضاعف ثلاثة مرات تقريبًا تركيز الميثان. وظهرت مركبات جديدة بكثرة، مثل مركبات كلوروفلوروكربون CFCs، أو الأكــسيد الأولــى لــلأزوت protoxide d`azote. ولكل هذه الغازات زمن إعادة تدوير طويل نسبيًا (من عقــد بالنسبة للميثان، إلى قرن بالنسبة لثانى أكسيد الكربون، أو بضعة قــرون بالنــسبة لمركبات CFCs) ومن ثم تنزع إلى التراكم فى الجو. وفى الواقــع، وبعيــدًا عــن التطور الذى تم التحقق منه حتى الآن حول التركيب الكيميائى للجو، فــإن تتبعــه الذى لا مفر منه هو الذى يمثل مشكلة. وقد يكون على القرن المقبل أن يشهد مــا يعادل تضاعف المحتوى الجوى لثانى أكسيد الكربون (وتم الحــصول علــى هــذا المعادل بجمع تأثير كل الغازات على ظاهرة الاحتباس الحــرارى) بالنــسبة لكــل السيناريوهات التى يمكن مواجهتها في الوقت الراهن.

ومن المؤكد، يمكن للعديد من البارامترات أن تضع نموذجًا لهــذا التطــور، وتقترب من أو تبتعد عن هذا المصير. وقبل كل شيء، بالتأكيد، الأخذ فى الاعتبار خواص التطور الاقتصادى والديموجرافى للكوكب، والتدابير السياسية التى ســيتم اتخاذها للتعديل. وأيضًا مجموعة من الآليات الكيميائية أو البيولوجية المعقــدة. ولا يمكن مثلاً، لثانى أكسيد الكربون الذى يُطرح فى الجو، أن يُقذف بــه فــى خــزان جوى خامل: سينتج عنه بالعكس افتقاد المنظومة الديناميكيــة لاســتقرارها والتــى كانت قد توازنت خلال آلاف السنوات الماضية، حيث يُعاد دائمًا تدوير ثانى أكسيد الكربون بين النباتات القارية، والمحيط والعوالق النباتية.

وفى الوقت الراهن فإن الكربون الملائم لثانى أكسيد الكربون، النــاتج عــن حرق الكربون أو النفط يمثل نحو ٥ إلى ٦ جيجا طــن (الجيجــا طــن مليــارات الأطنان) سنويًا يضاف إليه الجزء الخاص بإزالة الغابات، وهو الأكثــر صــعوبة

بكثير فى تقديره لأنه يُعوض جزئيًا بنمو جديد للنباتات، لكن يصل إلى مقدار ١ جيجا طن، ويتراكم فى الجو. ولا يبقى فى الهواء سوى نصف هذا الكربون، حيث يزيد إلى نحو ٣ جيجا طن سنويًا. والباقى يُستعاد بواسطة المحيط، أو النباتات القارية. ومع ذلك ففى المستقبل، كما سنرى فيما يلى، يمكن أن يتغير هذا الوضع، إذا حدث تعديل لتأثير تلك المستودعات المحيطية وتلك الخاصة بالغلاف الجوى، بواسطة التغيرات المناخية.

ظاهرة الاحتباس الحرارى

إذا أثارت زيادة هذه الغازات - التى قد تكون من جانب آخر سامة - مشكلة، فإن ذلك يعود إلى أنها تضخم ظاهرة طبيعية بارزة تمامًا، يطلق عليها ظاهرة الاحتباس الحرارى effet de serre. وتلعب هذه العملية دورًا مهمًا بالنسبة للغازات القليلة فى الجو (بخار الماء، وثانى أكسيد الكربون، والميثان، والأوزون): حيث تمنع الأشعة تحت الحمراء الأرضية من المغادرة الحرة للكوكب، وهى التى تحافظ بشكل كافٍ على الحرارة بالقرب من الأرض لكى تجعل الكوكب قابلاً للسكنى (وإلا قد تصل درجة حرارته المتوسطة إلى - ١٨ درجة). وعلى ظاهرة الاحتباس الحرارى الطبيعية، قد تضاف فى هذه الحالة ظاهرة احتباس حرارى إضافية، ترتبط بالأنشطة الإنسانية، والتى يمكن حساب قيمتها بطريقة دقيقة بدرجة كافية. وتأثير الزيادة المكتسبة حتى الآن للغازات على ظاهرة الاحتباس الحرارى تصل إلى ٢,٤ وات لكل متر مربع. ولقد قادنا تضاعف ثانى أكسيد الكربون (أو بشكل أكثر دقة نقول سيقودنا، حيث إننا رأينا كيف أن هذا المصير لا مفر منه تقريبًا) إلى ٤ وات لكل متر مربع. وقد تبدو هذه الأرقام ضئيلة مقارنة بالعمل العام للآلية المناخية: ويصل الإشعاع الشمسى المُمتص على قمة الغلاف الجوى، والذى يسيّر المنظومة المناخية، إلى ٢٤٠ وات لكل متر مربع، ومن ثم فإن الاضطراب المرتبط بعصر الحياة البشرية[٥٢] هو اضطراب فى الجزء من مائة

(٥٢) المرتبط بعصر الحياة البشرية anthropique: مرتبط بالبشر أو بعصر الحياة البشرية. (المترجم)

للآلة الحرارية "كوكب الأرض". ولكن إذا فكرنا أن درجة حرارة كوكبنا ٣٠٠ درجة مطلقة (أو كلفن)، فإن هذا التعديل كافٍ (كما نتحقق منه بمساعدة نماذج تفصيلية) لتعديل درجة حرارة السطح بضعة درجات، وهو مقدار كبير، حيث إنه من ٥ إلى ٦ درجات، مثلاً، تفصل بيننا وبين عصر جليدى. ومن ثم فإن الأمر يتعلق باضطراب شديد لمناخ يعتبر مستقر جدًا بشكل عام والذى نعرفه منذ ٨ إلى ١٠ آلاف سنة.

ضرورة النمذجة

إذا كنا نرغب فى تحديد قيمة أو خواص هذا التطور المستقبلى للمناخ، فإن الملجأ الوحيد هو النمذجة الرقمية. ويعتمد رد فعل المنظومة المناخية على زيادة ظاهرة الاحتباس الحرارى، بشكل كبير على آليات معقدة: تسخين، مثلاً، يرفع من كمية البخار فى الجو، وهو ما يُضخم ظاهرة الاحتباس الحرارى، ويقوم أيضًا بإذابة الثلج، أو الجليد، مما يجعل انعكاس الشعاع الشمسى أقل. والعنصر الذى يجعل هذا الدور أكثر صعوبة فى تحديده دون شك هو الغطاء الثلجى، الذى يمكن أن يعكس الشعاع الشمسى، وهو ما يبرد الكوكب فى هذه الحالة، لكنه هو الذى يحدث أيضًا ظاهرة احتباس حرارى ذات شأن، وهو موقع تسخين مهم يصاحب تكثف الماء.

وتعتبر النماذج الرقمية محاولة لتخليق كوكب افتراضى، وتدار بواسطة منظومات معادلات تمثل مجمل هذه العمليات: معادلات ديناميكا حرارية ترتبط بالإشعاع الشمسى أو الأرضى، معادلات ديناميكية تتيح وصف تطور التيارات المحيطية أو الدوران الجوى.

وعلى مر السنوات، تتمكن هذه النماذج من تمثيل السلوك الخاص الواقعى لعمل كوكبنا. وفقط بفعل المعادلات الأساسية للفيزياء يمكن محاكاة كل الأنماط الضخمة لتقلبية المناخ: الدورات الموسمية، الرياح الموسمية مع الأمطار الغزيرة، الصّابيات، الفوارات الهوائية، تيار الخليج Gulf Stream، وحتى (أيضًا بصورة

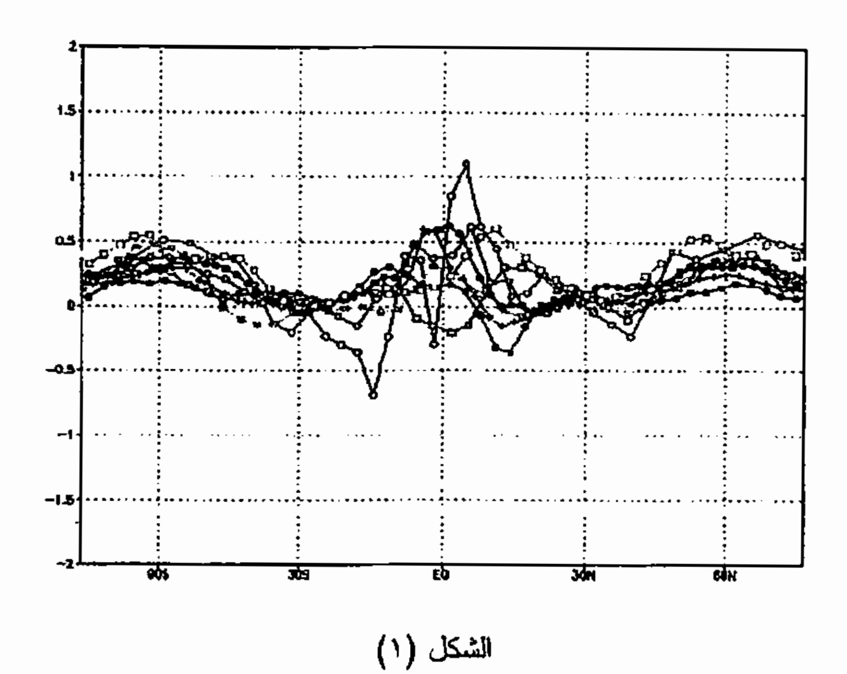
غير تامة) بعض أنماط التذبذبات الطبيعية مثل حوادث النينو. وفي الواقع تتم مراعاة الهشاشة الاستثنائية للنماذج حيث إنه لحل المعادلات الفيزيائية التي تستند إليها هذه النماذج يجب إعطاء بنية شبكية maillage: الرياح أو التيارات، درجة الحرارة، بخار الماء، السحب، ملوحة مياه المحيط، ويتم حساب كل ذلك عند عقد شبكة ذات ارتخاء كافٍ: بضع مئات من الكيلومترات تبعًا للاتجاه الأفقي، وفي حدود كيلومتر تبعًا للاتجاه الرأسي. وهكذا يقوم مفهوم النماذج نفسه على فكرة أنه، بالنسبة للرياح الجوية والتيارات المحيطية، يكون جزء "المستوى الكبير" للسيلان، الذي ينتظم على مستوى مئات أو آلاف الكيلومترات، سائدًا وكافيًا لتحديد (على الأقل بطريقة إحصائية) دور المستويات الأكثر صغرًا، وخاصة تلك التي تكون نشيطة في تكوين السحب، أو في التفاعل مع السطح أو مع الشواطئ. وتبدو هذه الفرضية بوجه عام متحققة إلى حد بعيد، ولكن في حدود معينة، حدود تتضمن مصدرًا أوليًا لعدم اليقين، من الناحية الأساسية، يؤثر على نتائج النماذج. وبعض التحركات التي يتم تمثيلها هكذا بطريقة مبسطة ("بارامترية")، مثلاً تحركات الحمل المصاحبة لتكوّن ركامات مزنية،[٥٣] تُعد من بين تلك التي تسيطر بشكل أكثر قوة على التراصف stratification الرأسي للجو (أو المحيط)، أي التوزيع الرأسي لدرجات الحرارة، أو رطوبة الهواء أو ملوحة الماء. وتلعب هذه التغيرات في التراصف الرأسي دورًا مهمًا على الاستجابة المناخية لظاهرة الاحتباس الحراري. ولكن حتى لو كانت النماذج المناخية محدودة هكذا ببنية شبكية غير متقنة أيضًا، فإن هذه النماذج تتشبع بها قوة الحاسبات الأكثر سرعة ولا يوجد حتى الوقت الراهن منفذ آخر للمشكلة. غير أنه في المستقبل القريب، قد يتغير الموقف: يمكن أن تتيح آلات قوتها عدة عشرات من أجهزة Teraflops التي أُعلن عنها في اليابان أو الولايات المتحدة، تحقيق قفزة نوعية في حل واضح لبعض تحركات الحمل في النماذج العامة للدوران الهوائي.

---

(٥٣)رُكام مُزني cumulo - nimbus: أو صَيِّب (كتلة من السحب العالية الضخمة تطلق وابلاً من المطر وثلجًا وعواصف). (المترجم)

وعندما يتم إخضاع تلك الكوكبات الرقمية لظاهرة احتباس حراري أكثر قوة، فإنها تستجيب كلها بزيادة في درجة الحرارة المتوسطة. وهذه الزيادة تُلاحظ نحو القطبين أكثر منها في المناطق المدارية حيث يلعب الحمل الجوي، عند نقله لحرارة الأرض نحو الطبقات العليا للجو، دورًا محدودًا. ويرافقه تغير مهم لنظم الهواطل، والتي تُلاحظ بالعكس بشكل أكثر في خط العرض المنخفض. وحساسية الدورة الخاصة بعلم المياه hydrologique لزيادة درجة الحرارة تكون في الواقع أكثر شدة في المناطق التي تكون أكثر سخونة سابقًا. وبعيدًا عن عناصر التقارب الكبيرة هذه، يمكن أيضًا في هذا المجال حدوث اختلافات بارزة بين النماذج، التي تناظر في جانب كبير منها معالجة متغيرة لتأثيرات مستوى صغير الذي أشرنا إليه سابقًا، وخاصة تمثيل السحب. وفي السيناريوهات الأكثر كلاسيكية حيث يتم تقدير زيادة في ثاني أكسيد الكربون قيمتها ١ في المائة سنويًا (تلك التي تناظر تعميم بسيط للنزعات الراهنة، إذا مزجنا دور كل الغازات على ظاهرة الاحتباس الحراري في (ثاني أكسيد كربون مكافئ)، يمكن أن تتغير زيادة درجة الحرارة المتوسطة في ٢٠٥٠ من ١ إلى ٣ درجات تقريبًا تبعًا للنماذج. ويشير الشكل إلى نوع التطابق الذي يمكن الحصول عليه للنماذج بالنسبة لمجال تنبؤ دقيق بشكل خاص، ولكنه مهم بشكل خاص على مستويات نتائج محتملة لتغير مناخي: معدلات الهواطل. وتتنبأ مجموعة النماذج بتنشيط نظام المياه، الذي تشهده مناطق الرطوبة الأكثر رطوبة – في المنطقة الاستوائية أو في خطوط العرض المتوسطة – ومناطق جفاف أكثر جفاف – في المناطق المجاورة لخط الاستواء، نحو 30° شمالاً أو 30° جنوبًا – لكن هذا التأثير المتوسط يظهر بطريقة مختلفة كميًا تبعًا للنماذج والتغيرات المحلية يمكن أن تكون مهمة.

ويلعب المحيط، من واقع قدرته الضخمة على توليد الحرارة، دورًا مختلف تمامًا، يؤثر بشكل خاص على السرعة التي يمكن أن تحدث بها التغيرات المناخية؛ لأن هذا هو الزمن الضروري لتسخين الطبقات السطحية للمحيط التي تعطي المدة الأساسية ليسخن بطريقة ذات دلالة، سيسخن بقدر ما إذا تم تقليل انطلاقات الغاز في ظاهرة الاحتباس الحراري.



الشكل (١)

تغيرات الهواطل المتوسطة
بالنسبة لمجمل النماذج المعرضة لتضاعف ثانى أكسيد الكربون،
الجوى (LeTreut and McAvany ٢٠٠٠)

لكن هناك ما هو أكثر من ذلك، يمكن للدوران المحيطـــي نفـــسه أن يتغيـــر. فالقوة غير العادية لعمليات حدوث ظاهرة النينيو خلال نهاية القرن تطرح المـــشكلة (التى لم تُحل بعد) حول ارتباطها المحتمل ببداية تسخين الكوكب. وتشير كل النماذج على حد سواء، في حالة السخونة المناخية، إلى تباطؤ الدوران المحيطي فى المحيط الأطلنطى الشمالى. ومحرك هذا الدوران هو قدرة مياه الأطلنطى الشمالى، بـــالقرب من القطب الشمالى، على الغوص وتكوين المياه العميقة. وتـــرتبط هـــذه الخاصـــية بملوحة المياه، التى تميل تمامًا إلى الانخفاض فى المناخ الأكثـــر ســـخونة، بزيـــادة الهواطل. وقبل كل شيء فإن هذا التغير يعقد التنبؤ بما قد يكون حدث فى أوروبـــا، حيث من الممكن أن المناخ قد برد، حتى فى أحوال السخونة العامة. ولكن يـــضاف إلى ذلك، إمكانية بعض النماذج أن تصل إلى التوقف تقريبًا لتكوّن المـــاء العميـــق،

وهو تغير سريع وكارثي يشبه ما يمكن ملاحظته فى الماضى فى زمن تكسر الجليد عند الذوبان: عندئذ انجذب المحيط بحالة توازن أخرى مثل تلك التى يوجد عليها فى الوقت الراهن. ويثير ذلك مشكلة جديدة: بالنسبة لبعض النماذج، فى هذه الحالة، يمكن لمنظومة مناخية أن تتصف ببعض الحدود (تميل فى هذه الحالة نحو التضاعف ثلاث أو أربع مرات لثانى أكسيد الكربون)، وهى حدود غير معروفة بشكل جيد، ويصعب تقديرها فى الحالة الراهنة للعلم، لكن التى بعدها قد تكون التغيرات المناخية قد أصبحت عنيفة وغير قابلة للانعكاس. ويتعلق الأمر بشكل من المخاطرة أكثر صعوبة عند أخذها فى اعتبارنا، على مستوى رد الفعلى السياسى، من جوانب عدم اليقين التى قدمناها سابقًا والتى ترتكز فقط على اتساع العملية.

نماذج لاتزال ناقصة

خلال السنوات الماضية أنجز بناء النماذج المناخية عمليات تقدم مهمة: النماذج التى كانت فى البداية جوية تمامًا أدمجت تمثيلاً أكثر فأكثر تعقدًا للمحيطات، ثم لجليد البحر. ويعتبر هذا المسعى نحو التمثيل هو دائمًا أكثر تعقيدًا وأكثر اكتمالاً للمنظومة المناخية، أساسى للغاية. ويوجد مثلاً تزاوج وثيق بين الدورات المناخية والكيميائية الحيوية الذى يضبط التركيب الكيميائى للجو والمناخ نفسه. ولكى نستعيد مثال دورة الكربون التى سبق أن وصفناها فى البداية، فإن عمليات محاكاة فى IPSL فى باريس، أو فى مركز هادلى فى إنجلترا، أوضحت أن المحيط أو النباتات تستعيد ثانى أكسيد الكربون الموجود فى الجو أقل عندما يكون الطقس أكثر حرارة. ويمكن أيضًا محاكاة التسخين المرتبط بظاهرة الاحتباس الحرارى فى الفترات الأولية بانبعاث غبار أو رذيذات aerosols تبرد المنظومة المناخية (ولكنها لا تتراكم فى الجو، ولا تلغى الخطوط العريضة للتوقعات التى سبق أن وصفناها). ولأخذ هذه التأثيرات فى الحسبان فإن النماذج تتطور: تكون فيزيائية تمامًا فى البداية ثم تتعقد تدريجيًا إلى معاملات كيميائية وكيميائية حيوية، ويقترب تعقدها بالتدريج من تعقد العالم الواقعى.

ولم يعد يتم التنبؤ بكل نتائج التغيرات المناخية الأكثر إثارة للرهبة بطريقة مباشرة بالنماذج، لكن يتم توليدها بمرحلة تكميلية من الاستدلال. ومثال لذلك، توسع المحيط، يجب أن يؤدى ذوبان طبقات جليد الجبال إلى ارتفاع فى مستوى البحار بضع عشرات من السنتيمترات خلال منتصف القرن المقبل. ومن الممكن أن يتغير أيضًا اطراد وقوة الأعاصير الاستوائية. ونحن نعرف أن هذه الأعاصير لا تظهر سوى فوق المياه عند درجة حرارة أعلى من 27° مئوية. ومن الصعب إنجاز تنبؤ صحيح: ولكن يمكن التفكير فى أن مناطق غير مأهولة ستشهد أعاصير فى المستقبل القريب، أو أن قوة الأعاصير يمكن أن تتغير (مثلاً: أعاصير أقل لكنها أكثر شدة). وبشكل عام من المؤكد ومن المهم تقدير النتائج القصوى التى يمكن أن تصاحب هذه الحالة. وتلك النتائج ذات أصل إحصائى بالضرورة، ولا يمكن وصفها أيضًا بطريقة واضحة بواسطة النماذج. ومن ثم فإننا نحاول - بنجاح متعدد أيضًا - ربطها بالقرائن المناخية، التى تناظر وصفًا لدوران جوى على مستوى عالٍ، والذى يمكن التنبؤ به بالنماذج. وفى أوروبا مثلاً، فإن جزءًا كبيرًا من التقلبية المنتظمة للمناخ، وخاصة عدد محدد من الأحداث الإقليمية ذات الاتساع الشديد (عواصف تعود من جديد، فصول الشتاء، وحالات البرودة الشاذة) تكون مصحوبة بتغير يُطلق عليه قرينة تذبذب شمال الأطلنطى (وبالإنجليزية NAO)، الذى يناظر اختلافًا فى الضغط على مستوى البحر بين مدينتى لشبونه Lisbonne وريكيافيك Reyjavick، وتتميز بالقوة النسبية لضديد إعصار[٥٤] أكوريس Acores وبانخفاض إيسلاند Islande. ومنذ عدة سنوات زادت هذه القرينة (بغير انتظام)، وهو ما يماثل أيضًا ما تتنبأ به أغلب النماذج بالنسبة لسخونة المناخ.

---

(٥٤) ضديد الإعصار anticyclone: منطقة يرتفع فيها الضغط الجوى نسبيًا عما حولها. (المترجم)

الخلاصة

إذا حاولنا إجمال هذه العناصر، يمكن اعتبار أن دور النمذجة خلال كل السنوات الأخيرة كان إتاحة إطار على قدر من الدقة والالتزام بقدر الإمكان، لاستكشاف حالات المستقبل الممكنة لكوكبنا. ونقطة الانطلاق بسيطة جدًا: زيادة غاز مثل ثانى أكسيد الكربون أو الميثان تؤدى إلى ظاهرة احتباس حرارى بمكن أن تسبب سخونة بضع درجات. ولقد رأينا دليلاً فيزيائيًا "لحسن الإدراك" يصل إلى هذه النتيجة – وهو حساب سبق أن قام به أرهينيوس Arrhenius فى بداية القرن. لكن عمل كوكبنا معقد جدًا ورهان باحثينا كان تحديد ما إذا كان هذا التعقد يمكن أن يتيح انعكاس الفكرة البسيطة التى أمكن الحصول عليها فى البداية حول المشكلة. والإجابة، بعد عقدين من الدراسة تم إجراؤها بالتوازى فى نحو خمسة عشر مختبر، وحدث دائمًا، فى إطار التزام شديد بالمعادلات الأساسية للفيزياء المتاح بالنماذج، أن استدعى الأمر سخونة المنظومة المناخية حتمًا: وحده طيف المستقبل المحتمل هو الذى اتسع – وغالبا فى اتجاه الزيادة المحتملة للمخاطر. ويعتبر هذا التقارب النوعى للنماذج عنصرًا بارزًا تمامًا، ومن وجهة النظر هذه يعكس عدم اليقين الذى يحيط أيضًا بتنبؤاتها أقل فأقل جهل العلماء، وأكثر فأكثر عامل خطر يرتبط بتعقد العالم الواقعى الذى لا يمكن التنبؤ به بكامله.

ومن جانب آخر فالأشد من اتساع التغيرات المناخية القادمة (التى تكون أقل أهمية من تلك التى يمكن أن يكون الكوكب قد شهدها فى العصور الجليدية مثلاً) هو السرعة التى تحدث فجأة لهذه التغيرات وهو ما يقوم عليه عامل الخطر الأكبر، والذى يفرض مثل تلك التدابير اللازم اتخاذها منذ الآن. ومنذ بداية القرن زادت درجة الحرارة الإجمالية من ٠,٦ إلى ٠,٩ درجة مئوية. وإذا استمر هذا التغير فإن الالتباسات الأخيرة التى مازالت قائمة سوف تظهر من تلقاء نفسها. لكن الوقت سيكون قد تأخر بالنسبة لمعالجة الأمر.

مراجع:

– Friedlingstein (P.), Bopp (L.), Ciais (P.), Dufresne (J.-L.), Fairhead (L.), Le Treut (H.), Monfray (P.) et Orr (J.) , *Positive Feedbacks of the Carbon Cycle on Future Climate Change (submitted).*

– IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1990 : *Climate Change : the IPCC Scientific Assessment*, J. T. Houghton, G.J. Jenkins and J. J. Ephraums (eds), Cambridge, UK, Cambridge University Press, 356 p.

– IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1994 : *Climate Change 1994 : Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B. A. Callander, E. Haites, N. Harris et K. Maskell (éds), Cambridge, UK, Cambridge University Press, 339 p.

– IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1995 : *Climate Change 1995 : The science of Global Change*, J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg et K. Maskell, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 572 p.

– Le Treut et McAvaney, « A Model Intercomparison of Equilibrium Climate Change in Response to CO_2 doubling », *IPSL Note N° 18*, Paris, Institut Pierre Simon Laplace, 2000.

– Li (Z. X.), Le Treut (H.), « Cloud-radiation feedbacks in a general circulation model and their dependence on cloud modelling assumptions », *Climate Dynamics*, 7, 1992 p. 133-139.

– Manabe (S.) et Stouffer (R. J.), « Multiple-century response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of atmospheric carbon dioxide », *J. Climate*, 7, 1994 p. 5-23.

– Penner (J. E.), Charlson (R. J.), Hales (J. M.), N. S. Laulainen, R. Leifer, T. Novakov, J. Ogren, L. F. Radke, S. E. Schwartz et L. Travis, « Quantifying and minimizing uncertainty of climate forcing by anthropogenic aerosols », *Bull. Am. Met. Soc.* 75, 1994 p. 75-400.

– Roeckner (E.), Siebert (T.) et Feichter (J.), « Climatic Response to Anthropogenic sulfate forcing simulated with a general circulation model », *Aerosol Forcing of Climate*, R. Charlson and J. Heintzenberg (éd.), 1995 p. 349-362, John Wiley and Sons.

– Santer (B. D.), Taylor (K. E.), Wigley (T. M. L.), Penner (J. E.), Jones (P. D.) et Cubasch (U.), « Towards the detection and attribution of an anthropogenic effect on climate », *Clim. Dyn.*, 12, 1995, p. 77-100.

- Schlesinger (M.E.) and Mitchell (J.F.B.), « Climate model simulations of the equilibrium climatic response to increased carbon dioxide », *Rev. Geophys.*, 25, 1987, p. 760-798.

– Senior (C. A.) et Mitchell (J. F. B.), « Carbon dioxide and climate: The impact of cloud parameterization », *J. Climate*, 6, 1993, p. 393-418.

علم الأحوال الجوية(٥٥)

بقلم: أوليفييه تالاجران

Olivier TALAGRAND

ترجمة: عزت عامر

في ٢٦ و٢٧ ديسمبر ١٩٩٩ ضربت عاصفتان متعاقبتان فرنسا، بقوة تبدو لا سابقة تاريخية لها. وبالرغم من أن الأرصاد الجوية الفرنسية كانت قد أعلنت عن رياح عنيفة في كل حالة من الحالتين، فإن شدة هاتين العاصفتين تخطت إلى حد بعيد ما كان متوقعًا، وأخذتا الجزء الأكبر من السكان على حين غفلة. ما هي حدود التنبؤ بالأحوال الجوية؟ وأبعد من ذلك هل هي ممكنة أيضًا؟ وهل يقتصر التنبؤ بالأحوال الجوية نفسه ببساطة على مسألة القدرة على الحساب، أم أن التطورات الأساسية في معرفتنا بالجو ضرورية أيضًا؟ هذه بعض الأسئلة التي سوف نتناولها هنا بإيجاز.

يعرف كل شخص على الأقل ما هي الشمس التي تعتبر أصل ظاهرة الأحوال الجوية. وبشكل أدق، فإن تحركات الجو والمحيط تحدث بسبب الاختلاف في السخونة بين خطوط العرض المنخفضة وخطوط العرض المرتفعة. ويسبب هذا الاختلاف اختلافات في الضغط، التي تؤدي هي نفسها إلى تحركات، يكون أثرها نقل الطاقة من خطوط العرض المنخفضة، الأكثر سخونة نحو خطوط العرض المرتفعة، الأقل سخونة. ويجدد اختلاف التعريض للشمس باستمرار اختلافًا في درجة الحرارة، ويسيّر الآلة الجوية. وتلك آلة حرارية هائلة، حيث المصدر الساخن هو الإشعاع الشمسي. ومثل كافة الآلات الحرارية، فإن لها مصدر تبريد، وهو في هذه الحالة الطاقة التي تطلقها الأرض نحو الفضاء الخارجي على هيئة أشعة تحت حمراء.

---

(٥٥)نص المحاضرة رقم ٢٠٦ التي ألقيت في إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٤ يوليو ٢٠٠٠.

والدوران الأرضى هو المقوم الأساسى الثانى لعلم الأحوال الجوية meteorologie. وتكتسب الجزيئات السائلة، التى تنتقل من خط العرض تحت تأثير اختلاف درجة الحرارة، حركة دوران بالنسبة للأرض نفسها. وهكذا فإن الأعاصير المتكونة، المصحوبة بمراكز ضغط منخفض ومرتفع، تكون هى المنخفضات وضديدات الأعاصير لخرائط الأحوال الجوية. وتتولد باستمرار عن اختلاف درجة الحرارة، وفى خطوط العرض المتوسطة، يقوم التنبؤ بالأحوال الجوية بشكل أساسى على التنبؤ بتكوّن هذه الأعاصير، وتضخمها، وانتقالها، وتفاعلها المتبادل، ثم زوالها.

وتحدث تأثيرات أخرى أيضًا، على رأسها دورة الماء. والماء يوجد فى الجو الأرضى على هيئة ثلاثة أطوار، صلب وسائل وغازى. وكميات الطاقة التى تُستعمل فى تغيرات الأطوار الملائمة تساهم بطريقة ذات دلالة فى الموازنة الطاقية للجو. ومن جانب آخر، فإن الخواص الإشعاعية للجو تعتمد على محتواه من الماء، وعلى الأطوار التى يوجد عليها الماء. وفيما يخص مثلاً السحب، فإنها لا تعكس فقط جزءًا مهمًا من الإشعاع الشمسى الساقط، لكنها تمتص، بواسطة "ظاهرة الاحتباس الحرارى"، جزءًا من الأشعة تحت الحمراء المنبعثة من سطح الأرض وطبقات الجو التحتية.

والقوانين الفيزيائية التى تتحكم فى علم الأحوال الجوية معروفة تمامًا. وهى القوانين "الميكانيكية" وقوانين "الديناميكا الحرارية" الكلاسيكية، وهى مصاغة بوضوح ومعروفة تمامًا منذ أكثر من قرن. فكيف يحدث أنه فى تلك الأحول يكون التنبؤ بالأحوال الجوية بهذه الصعوبة، ويمكن لعدم اليقين أن يسود، لأجل يصل أحيانًا حتى إلى يوم أو يومين، فيما يخص حدوث أو عدم حدوث عاصفة؟ لذلك عدة أسباب، لكن الأكثر جوهرية بينها تم فهمها بوضوح وتفسيرها بواسطة عالم الرياضيات هنرى بوانكاريهHenri Poincare. "لماذا يكون علماء الأحوال الجوية على هذه الدرجة من القلق فيما يخص التنبؤ بالزمن ببعض اليقين؟ ولماذا يبدو أن

سقوط الأمطار، والعواصف نفسها تحدث صدفة، حتى أن الكثير من الناس يجد من الطبيعى تمامًا الدعاء من أجل الحصول على المطر أو طقس صحو، بينما يجدون الأمر مثيرًا للسخرية أن يطلبوا خسوفًا للقمر أو كسوفًا للشمس بالدعاء؟ [.....] فى درجة الذروة بالزيادة أو النقصان فى نقطة بين بين، ينفجر الإعصار هنا وليس هناك، ويبسط أضراره الفادحة فى بلدان لم يكن يتعرض لها. ولو كانت درجة الذرة هذه معروفة، كان من الممكن معرفتها مسبقًا، لكن الأرصاد لم تكن محكمة بالدرجة الكافية ولم تكن على ما يكفى من الدقة، ولهذا السبب كان كل شىء يبدو عائدًا إلى تدخل الصدفة (العلم والمنهج Science et Methode ١٩٠٨). وبقدر دقة معرفتنا بالحالة الحالية للجو، سوف تتحول حالات عدم اليقين التى لا يمكن تجنبها بسرعة إلى عدم يقين ضخم فى حالة المستقبل. ومنذ بوانكاريه تم إثبات هذا التصور بكثرة بواسطة الأعمال النظرية والتجارب التى أُجريت بواسطة نماذج رقمية للجريان الجوى. وعمّم هذا التصور الأمريكى أ. ن. لورنز E. N. Lorenz، على هيئة صورة فراشة، حيث يسبب خفقان بسيط لجناحها اضطرابًا ينتهى، بالتضخم المتتالى، إلى إحداث إعصار فى مكان آخر حيث لم يكن هناك، أو كان هناك، ما يمنع تكوّن إعصار متوقع حدوثه.

وبالمصطلحات المعاصرة، يعتبر الجو منظومة "عشوائية"، يحدث أن يزداد فيها حتمًا كل عدم يقين أولى خلال الزمن، ليصل إلى عدم يقين كبير مثل التغيرية الطبيعية للمنظومة. ويتقاسم الجو مع العديد من المنظومات الفيزيائية الأخرى هذه الخاصية "الحساسية للأحوال الأولية".(٥٦) وتتصف غالبية عمليات جريان السوائل المضطربة بالخاصية نفسها، وبالتالى مع استحالة عملية التنبؤ بالتفاصيل على المدى البعيد. وفى حالة الجو، حتى مع التفاؤل الأكثر واقعية بالنسبة لكثافة ودقة منظومات الرصد المستقبلية، يمكن التخمين إلى عشرة أيام إلى المدى الذى ستظل كل التنبؤات التفصيلية بالأحوال الجوية فيما بعده مستحيلة إلى الأبد.

---

(٥٦) انظر المحاضرة رقم ٢١٨ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف، د. رويل D. Ruelle.

ما حالات وسائل التنبؤ بالأحوال الجوية؟ الأداة الأكثر مدعاة للثقة والأكثر فعالية هي إلى حد بعيد "النمذجة الرقمية" أي الحساب التدريجي، انطلاقًا من حالة الجو المرصودة، للتغير المستقبلي للجريان. ولم يتم العثور حتى اليوم على أي منهج (وليس هناك أي أمل البتة في العثور عليه) يتيح توفير الحساب الواضح والتفصيلي لتغير الجريان الجوي بين اللحظة الحاضرة واللحظة المرغوب التنبؤ بها. وتقوم النماذج الرقمية للتنبؤ بالأحوال الجوية على قوانين أساسية، ذُكرت سابقًا، للميكانيكا والديناميكا الحرارية الكلاسيكيين. ويتعلق الأمر بقانون حفظ الكتلة، الذي يقول ببساطة إن الكتلة تنتقل بالجريان بلا فقد ولا إيجاد من العدم، وقانون حفظ الطاقة، الذي يقول بأن التغير في الطاقة الداخلية لجزئ سائل يساوي الفرق بين الطاقة التي استقبلها والطاقة التي فقدها وقانون حفظ كمية الحركة، الذي يقول بأن تسارع جزيء السائل يساوي مجموع القوى الميكانيكية المؤثرة على هذا الجزئ. ويجب أن يُضاف إلى ذلك القوانين التي تحكم ظواهر فيزيائية نوعية، مثل القانون الذي يحكم امتصاص أو إطلاق الأشعة عن طريق الغاز الجوي.

ولاستعمال الحسابات الضرورية، يجب أولاً صياغة القوانين الفيزيائية الأساسية في شكل ملائم. ويتم لهذا الغرض تحديد هيئة شبكة مترابطة maillage خليط على حجم الجو، أي تقسيم الجو إلى "علب" تغطي حجمه بالكامل. ويتحدد عندئذ الجريان، في النماذج المستخدمة حاليًا، بتعيين درجة الحرارة، ومركبتي الريح الأفقية، ومحتوى الرطوبة داخل كل علبة في الشبكة المترابطة. وفي حالة تحديد الحالة الراهنة للجريان بهذه الطريقة، يتم حساب تغيره في المستقبل على أساس القوانين الفيزيائية التي ذكرناها توًا، وفي الحدود المسموح بها بنوع الشروط الأولية، وهي ناقصة بالضرورة، وتلك الخاصة بالنموذج الفيزيائي، وهو ناقص بالضرورة أيضًا.

وهكذا فإن التنبؤ الرقمي بالأحوال الجوية مؤسس على قوة الحساب الإجمالي. ويعتمد كليًا على تيسر حاسبات قديرة. ولقد ظهر من جانب آخر مع

الحاسبات الإلكترونية الأولى، فى السنوات التى تلت الحرب العالمية الثانية، بحث من عالم الرياضيات والفيزياء الأمريكى من أصل مجرى ج. فون نيومان J. von Neumann. ومع التقدم المطرد لقدرة الحاسبات، خوارزميات الحساب، ولوسائل الرصد ولمعرفتنا بالعمليات المتعددة التى تتم فى الجو، حدث تحسن تدريجى لنوع النماذج والتنبؤات. واغتنت بالتدريج النماذج، التى كانت فى البدء محدودة بالميكانيكا والديناميكا الحرارية لغاز مثالى على هيئة طبقات تحت تأثير الثقل، بواسطة الوصف الواضح للعمليات الأكثر فأكثر تنوعًا: امتصاص الإشعاع الشمسى وانبعاث الإشعاع الجوى نفسه، ودورة الماء المصاحبة لهذه التأثيرات الإشعاعية، وتبادل الماء وتأثيرات الاحتكاك بين الجو والأسطح القارية والمحيطية التحتية... إلخ. وبالنسبة لما هى عليه التغيرات الأكثر معاصرة، يمكن ذكر أخذ تأثيرات النباتات فى الاعتبار، والتى تمثل خزانًا للرطوبة، الذى تغير حالته الخواص الإشعاعية للسطح ولقوى الاحتكاك الواقعة على هذا السطح، وأخذ الكساء الثلجى فى الاعتبار وتغيراته الزمنية، أو أيضًا تلك التى تخص كيمياء طبقة الستراتوسفير(٥٧) وتأثيراتها الإشعاعية.

وسنوضح حالة التطور والنتائج الراهنة للتنبؤ الرقمى بالأحوال الجوية من خلال مثال المركز الأوروبى للتنبؤات بالأحوال الجوية فى المدى المتوسط CEPMMT. ويخرج من هذا المركز، المشترك بين ثمانية عشر بلد أوروبى والموجود فى ريدنج Reading فى بريطانيا العظمى، كل يوم منذ ١٩٧٩ تنبؤًا رقميًا على مدى عشرة أيام لكل الجو. وفى ٢٠٠٠ كان النموذج المستخدم قائمًا على شبكة مترابطة تصل دقة تفاصيلها إلى نحو ٧٠ كم فى الاتجاه الأفقى، ونحو ١ كم فى الاتجاه الرأسى. ويحتاج الأمر فى مثل هذه الأحوال ٢٥ مليون بارامتر (درجة حرارة ومكونات الرياح...) حتى يمكن وصف حالة جريان فى لحظة ما

---

(٥٧) ستراتوسفير stratosphere: الغلاف الزمهريرى: الجزء الأعلى من الغلاف الجوى، وهو أعلى من الطبقة السفلى وأسفل الطبقة العليا. (المترجم)

فى كل نقاط الشبكة. ويتم حساب التطور المزدوج لهذه البارامترات بوضوح عن طريق خطوة زمنية ٢٠ دقيقة تقريبًا. ويحتاج الأمر إلى ساعة حساب فى الحاسب فيجيتسى Fujitsu VPP 700 (قوته ٢٠٠ جيجا خفقة Gflops) لإنجاز تنبؤ على مدى عشرة أيام.

ولا يمكن تقييم نوع منظومة تنبؤ إلا بواسطة الإحصاء، ومعيار الإسناد الأكثر طبيعية فى هذه الحالة هو التنبؤ بالأحوال الجوية، أى أن التنبؤ الذى يتوقع ليوم من سنة الطقس المتوسط المرصود فى الماضى عند اليوم نفسه. وبهذا المعيار، فإن تنبؤات CEPMMT مفيدة إحصائيًا حتى مدى سبعة أيام تقريبًا. وتكون التنبؤات فى المتوسط فى الشتاء أفضل منها فى الصيف، والقيم النموذجية لمدى هذه الفائدة هى ثمانية أيام بالنسبة للشتاء وستة أيام للصيف. ويعود ذلك إلى أن اختلاف الحرارة تبعًا لخط العرض، وهو ما سبق أن رأيناه، هو "محرك" دوران الهواء، ويكون أكثر حدة فى الشتاء، مما يتيح فى هذه الحالة تنبؤًا أفضل على المقياس الكبير. وبالإضافة إلى ذلك فإن الاختلافات اليومية فى التعرض للشمس تكون أكثر شدة فى الصيف منها فى الشتاء، ويسود على الأحوال الجوية الصيفية غالبًا ظواهر ذات مقياس صغير مكانيًا وزمنيًا، ترتبط مثلاً بالسخونة المحلية للشمس خلال النهار. وتحليل ظواهر المقياس الصغير هذه بواسطة النماذج الحالية يكون سيئًا، ويُدخل غالبًا عمليات فيزيائية هى نفسها سيئة المحاكاة بواسطة النماذج.

وتعتبر نوعية تنبؤات CEPMMT نموذجية بالنسبة لتنبؤات المراكز الكبيرة لرصد الأحوال الجوية. وإذا كان مدى الفائدة العملية للتنبؤات حوالى ستة أيام إحصائيًا، تكون نوعية التنبؤات الفردية مختلفة جدًا من موقع إلى آخر. وتعتبر بعض التنبؤات جيدة أيضًا بعد عشرة أيام، بينما تعتبر أخرى حتى الآن ذات نوعية متوسطة بعد ثلاثة أو أربعة أيام. وبالتنبؤ المسبق يكون مجال عدم اليقين فى التنبؤات الفردية مرغوبًا فيه جدًا بالطبع. وهذا ما دفع العديد من مراكز رصد الأحوال الجوية، ومنها CEPMMT، إلى أن تطور خلال السنوات الماضية

منظومات "تنبؤ إجمالى prevision d`ensemble". وقد سبق أن قلنا إن عدم اليقين فى التنبؤات ينتج بالدرجة الأولى من عدم اليقين فى الشروط الأولية للجريان الجوى. وفى منظومات التنبؤ الإجمالى، فبدلاً من إنجاز تنبؤ وحيد انطلاقًا من شروط أولية محددة بطريقة تكون أيضًا دقيقة بقدر الإمكان، يتم إنجاز مجموعة تنبؤات انطلاقًا من مجموعة شروط أولية حيث مفروض فى التشتت أن يدل عدم اليقين على حالة الجو الموجودة. وسوف يتم اتخاذ تشتت التنبؤات كمقياس لعدم اليقين فى حالة المستقبل.

وينجز CEPMMT بهذه الطريقة كل يوم ٥٠ تنبؤًا مختلفًا. وأثبتت هذه التنبؤات الإجمالية حتى الآن أنها مفيدة جدًا، حتى أن خطأ التنبؤ أصغر بكثير بالفعل، فى المتوسط الإحصائى، عندما يكون تشتت التنبؤات الإجمالية صغير جدًا. وفى المدى الأكثر طولاً، سوف يكون على هذه المنظومات للتنبؤ الإجمالى أن تتحول بالتدريج إلى منظومات "تنبؤ احتمالى prevision probabiliste"، سوف ينتج عنه احتمالات كمية بالنسبة لحالة الأحداث المتعلقة بالأحوال الجوية. ، وسوف تكون هذه التنبؤات الاحتمالية، إذا أمكن التعويل عليها، مفيدة جدًا، مثلاً بالنسبة لمن يجب عليهم اتخاذ قرارات فى مواقف حيث يكون للحالة المحتملة لحدث فى الأحول الجوية عواقب مالية مهمة.

وتعتمد نوعية التنبؤات بشكل أساسى على نوعية شروطها الأولية. حتى مع معرفة أن التنبؤ المحدد التفصيلى سيظل مستحيلاً إلى الأبد، ينبغى تحديد الشروط الأولية بدقة أيضًا بقدر الإمكان، وجنى أفضل فائدة من الأرصاد المتاحة. ونصطدم هنا بمشكلة جوهرية: تكون الأرصاد نفسها موزعة فى الزمن. وتقدم الأقمار الصناعية مثلاً فيضًا متصلاً من الأرصاد الجديدة. ومن ثم يلزم، حتى قبل بدء التنبؤ، أن نضع تطور الجو فى الاعتبار. ويعتبر "تمثيل الأرصاد" توفيق بين نموذج رقمى وجريان أرصاد موزعة فى الزمن. ويستعين هذا التمثيل بطرائق رياضية قوية، ولقد أصبحت له بالتدريج أهمية متزايدة فى التنبؤ الرقمى بالأحوال الجوية، وأصبح يستخدم فى تطبيقات أكثر فأكثر تنوعًا، مثلاً فى "إعادة تمثيل"

الأرصاد الماضية، المخصصة لإنتاج، على أساس نماذج وطرائق حساب راهنــة، وصفًا بالدقة الممكنة للجريان الماضي.

إذا كان التنبؤ التفصيلي والمحلي بالمطر، والسحب ودرجة الحــرارة يبــدو محدودًا بشكل حتمي بنحو عشرة أيام أو أكثر، لن يكون كل شيء لهذا السبب غير قابل للتنبؤ تمامًا أبعد من هذا المدى القصير أيضًا. هناك مواسم صــيف رطبــة، ومواسم شتاء معتدلة، فترات جفاف، وكل الظواهر التي تدوم أكثر بكثير من عشرة أيام، والتي يجب أن يكون من المحتمل التنبؤ بها بشكل جيد، وإن لــم يكــن بكــل تفاصيلها، فعلى الأقل بكل صفاتها العامة. ويتصف الجو من جانب آخر بصفة قــد تبدو متناقضة: كيف يحدث أن يكون في استطاعة الأحوال الجوية أن تختلف جــدًا من سنة إلى أخرى عندما يكون التعرض للشمس هو نفسه؟ ويلعب المحــيط هنــا دورًا أساسيًا. فبفعل قصوره الحراري الأكثر ضخامة، فإنه يستجيب بــبطء أكثــر كثيرًا من الجو للتغيرات في التعرض للشمس. ويؤدي أيضًا التفاعل المتبادل بــين المنظومتين، حيث يكون لكل منهما في ذاته من قبل سلوكًا معقدًا، واللذان يتطوران على مستويين زمنيين مختلفين، إلى زيادة تعقد آلة الأحوال الجوية. لكنهما يقــدمان أيضًا في هذه الحالة عناصر قابلية تنبؤ على المدى الطويل. والمثال الممتــاز هنــا هو ظاهرة النينو، وتلك السخونة للمياه السطحية للمحيط الهادي، تجاه خط الاستواء وبيرو.[٥٨] وأصبحت ظاهرة النينو، التي تحدث في المتوسط كل ثلاث أو خمــس سنوات، لكن بغير انتظام معين، قابلة للتنبؤ عدة أشهر أو عامًا بشكل مسبق. لكــن التنبؤ بها يستدعي استخدام نماذج "مزدوجة" للمحيط والجو. وتمثل هــذه النمــاذج، دون أن تكون شديدة التفاصيل على صعيد الأحوال الجوية، تغيرات الطاقة وكميــة الحركة بين الجو والمحيط. ويتم استخدامها أكثر فأكثر أيضًا في مرحلة تجريبيــة بكثرة، للتنبؤ الفصلي، أي في التنبؤ، لعدة شهور مسبقًا، بالسمات العامة لموسم ما، مثل السمة الخاصة بالجفاف في الصيف، أو الرطوبة الخاصة بالشتاء. ويمكننــا أن

---

(٥٨) انظر المحاضرة رقم ٢٠٤ التي ألقيت في إطار مشروع جامعة كل المعارف ج. بيكول J. Picault.

نتوقع أن التنبؤات الفصلية، التى لا تتوقع التفصيل اليومى للمطر والطقس الصحو، ولكن الميول العامة للأشهر مستقبلاً، ستقوم على أساس مطرد، وتُنشر فى متناول الجمهور، خلال السنوات المقبلة.

ويطرح كل ما سبق سؤالاً جوهريًا: إذا لم تكن كل ظواهر الأحوال الجوية قابلة للتنبؤ إلى الأجل نفسه، ما هى الظواهر القابلة للتنبؤ، وإلى أى أجل؟ تصيب "موجات برد" شتوية شديدة أوروبا الغربية أحيانًا. وتعود إلى ما اختار له علماء الأحوال الجوية اسم مألوف إلى حد ما هو "إيقاف blocage"، أى فى وجود ضديد إعصار على أوروبا الشمالية. وهذه الحالة مستقرة إلى حد بعيد، ويمكن أن تستمر عدة أسابيع. ومثل ما نعرف فإن التبادلات بين الجو والمحيط، وهو بعكس حالة ظاهرة النينو، لا تلعب هنا دورًا محددًا. ويبدو ببساطة أن الإيقافات تعود إلى انحرافات خاصة بالجو، والتى تمر من وقت إلى آخر، مستقلة عن أى سبب "خارجى"، فى طور مستقر بشكل خاص. ومع أن حدوث واختفاء الإيقافات لا يكونان متوقعين فى الوقت الراهن سوى ببضعة أيام مسبقًا، فإنه يوجد بالتأكيد هنا، على الأقل فيما يتعلق بمدة موجات البرد المصاحبة لهما، وفى محتوى فيزيائى مختلف عن النينو، إمكانية للتنبؤ بما يحدث خارج مدى التنبؤ التفصيلى. ويتيح لنا التقدم المشترك للرصد والدراسات النظرية وللنمذجة الرقمية الكشف التدريجى، والفهم الأفضل فالأفضل لتعقد الآلة الجوية. لكن مسألة التحديد الواضح لأى خواص الجو هى القابلة للتنبؤ وإلى أى أجل فهو أمر مفتوح أيضًا إلى حد بعيد، وربما يتضمن المشاكل الأساسية أكثر من غيرها التى مازالت فى الوقت الراهن تتطلب الحل.

ما جوانب التقدم التى يمكننا توقعها فى المستقبل القريب؟ خلال وقت طويل، تقيدت حالات تقدم التنبؤ بالأحوال الجوية بقوة الحاسبات. وعندما يصبح حاسبًا أكثر قوة متاحًا، سوف يستخدم علماء الحالات الجوية القوة الإضافة فى زيادة التحليل الفضائى spatial resolution لنماذجهم. وهذا، يصاحبه حالات تقدم متصلة للنمذجة، وخاصة فى التمثيل فى نماذج العمليات الفيزيائية الأكثر فأكثر تفصيلاً،

سوف يكفى لضمان زيادة بسيطة لكن متصلة فى نوع التنبؤات. وهذه العملية مشبّعة حاليًا، لسبب بسيط هو أنه لا يوجد ما يكفى من الأرصاد لملأ التحليلات الفضائية التى أصبحت متاحة بواسطة قوة الحاسبات. ومن ثم فإنه يمكن استخدام ذلك لأهداف أخرى، مثل التنبؤ بمجموعات موصوفة أكثر ارتفاعًا. لكن يمكن أيضًا توقع حالات تقدم مهمة فى تحسين منظومات الرصد، والتى، بعكس النماذج الرقمية نفسها، قد شهدت فى الواقع بعض التطور منذ نحو عشرين سنة. وتتيح أرصاد بالأقمار الصناعية أكثر فأكثر تعددًا، التى تستخدم مثلاً مصادر تقدمها شبكة الأقمار الصناعية لنظام الملاحة العالمى GPS ، وصفًا أكثر تفصيلاً ودقة بكثير للحالة الراهنة للجريان الجوى. وربما يكون ذلك بتحسين منظومة الرصد، التى تشارك فيها طرائق تمثيل أكثر فأكثر قوة، وطرائق تنبؤ إحصائى ملائمة، وهو ما سوف يؤدى خلال السنوات المقبلة إلى حالات تقدم أكثر أهمية.

الطقس[٥٩]

بقلم: روبيرت سادورني
Robert SADOURNY

ترجمة: عزت عامر

ما الطقس ؟

كما أن علم الأرصاد الجوية meteorologie هو علم الظواهر الجوية meteores، خاصة فيما مضى من عمره وما سيفعله، فإن علم المناخ climatologie هو العلم الخاص بالمناخ أو الطقس climat، أى علم الاحتمالات أو الإحصاءات خلال الزمن. نسمع فى أغلب الأحيان القول بأن احتفالاً فسد (مثلاً) بسبب الأحوال الطقسية السيئة: حينئذ يتعلق الأمر هنا، بالتأكيد، بالأحوال الجوية السيئة: لا يتغير الطقس إلا خلال عدة أيام، فيمر بنا طقس صحو فى طقس سيىء!

وعندما نتحدث عن الطقس، فعن أى منظومة فيزيائية نتحدث؟ تتضمن "المنظومة الطقسية" بالطبع الطبقات السفلى للجو حيث نعيش، والطبقات الأكثر ارتفاعًا حيث يرتبط السلوك بدقة تامة بتلك الطبقات: وبشكل رئيسى بالطبقة السفلية للغلاف الجوى troposphere وبمقدار أقل بالجزء الأعلى من الغلاف الجوى stratosphere. وتتضمن هذه المنظومة أيضًا المحيطات والطبقات السطحية للأراضى الظاهرة، التى تتبادل الماء والحرارة مع الجو، وبالتأكيد، بجليد الأرض والبحر. لكن دراسة الطقس لا تقتصر على دراسة منظومة فيزيائية. ويتفاعل الطقس بقوة شديدة مع كيمياء الجو والمحيط، وأيضًا مع الغلاف الحيوى biosphere، أى مع مجمل الكائنات الحية.

---

(٥٩)نص المحاضرة رقم ٢٠٧ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٥ يوليو ٢٠٠٠.

ودراسة المناخ، ليست فقط الرصد بشكل متواصل، لمجمل الكرة الأرضية وخلال فترات طويلة، وسلوك الجو، والمحيط، وجليد الأرض الظاهرة، ولكن أيضًا نمذجة مجمل آليات المنظومة لمحاكاة تطورها. وإنه بمقارنة الطقس المحاكى بالطقس المرصود نقيس مستوى فهمنا للآليات، ومن ثم قدراتنا على التنبؤ بالتطورات المستقبلية. ولقد تطور علم المناخ بسرعة جدًا فى عصر الأقمار الصناعية والحاسبات. وتتيح المجسات الفضائية الموضوعة على متن أقمار صناعية متتالية، على مدار شبه قطبى، مثل سلسلة الأرصاد الجوية الأمريكية العملياتية نيمباس Nimbus، متابعة تطور المقاطع الرأسية للجو والرطوبة فى مجمل الأرض. وتتيح لنا أجهزة قياس الإشعاع فى قطاع واسع، مثل ERBI أو ScaRaB أو CERES متابعة التطورات المكانية الزمانية لموازنة طاقة الكوكب. وترصد الأقمار الصناعية الأرضية الثابتة(٦٠) مثل ميتيوسات Meteosat باستمرار دائرتى الانقلاب(٦١) وخطوط العرض المتوسطة لموقعيهما الاستوائى على ارتفاع ٣٦٠٠٠ كم. ويقيس مقياس الارتفاع فى TOPEX - Poseidon، بدقة تصل إلى بضعة سنتيمترات، ارتفاع مستوى البحر، الذى يرشدنا إلى ديناميكا التيارات.

أما بخصوص نماذج الطقس، فإنها بالتأكيد نماذج تنبؤية، تصف تطورًا فى الزمن انطلاقًا من حالة أولية معطاة، مثل نماذج التنبؤ فى الأرصاد الجوية. لكن يجب أن تتضمن، بالإضافة إلى الجو، المحيطات وجليد البحر المتفاعلة، وكذلك الأغطية النباتية ومائيات الأراضى الظاهرة. وتحاكى هذه النماذج بشكل خاص دورة الماء فى مجملها، وتكوّن الأنواع المختلفة من السحب، وتكوّن جليد البحر، وبدأت تتضمن فى الوقت الراهن نباتات متفاعلة وبعض الدورات المناخية مثل دورة الكربون ودورة الأوزون فى الجزء الأعلى من الغلاف الجوى. وتصل كلفة

(٦٠)الأقمار الصناعية الأرضية الثابتة satellites geostationnaires: أقمار صناعية لا تغير مواقعها بالنسبة إلى الأرض. (المترجم)

(٦١)دائرة الانقلاب tropique: إحدى الدائرتين الصغيرتين فى الكرة الأرضية القائمتين بموازاة خط الاستواء واللتين تجرى بينهما دورة الشمس الشتوية الظاهرة حول الأرض. (المترجم)

الحساب إلى حد أنه، فى الممارسة، نادرًا ما تتجاوز مدة المحاكاة القرن، وبالنسبة لعمليات المحاكاة الأطول، يجب استخدام نماذج مبسطة. وتكون نتيجة المحاكاة تطورًا، أى حالات متتالية لحظية لمنظومة، ثم يعاد التفسير المناخى لهذه المحاكاة فى تحليل إحصائى لهذا التتالى للحالات. ومن جانب آخر فإن هذا أفضل لأن المناخ هو مسألة إحصائية تتيح لنا مد عمليات المحاكاة بشكل جيد أبعد من حد القدرة على التنبؤ بالجو (نحو عشرة أيام إضافية): ولا نهتم أكثر، كما هو الحال فى التنبؤ بالزمن، بالاضطرابات الفردية، ولكننا نهتم باحتمالات فرصها. وترتكز هذه الإحصاءات، إما على المتوسطات الزمنية، أو على مجموعات المحاكاة المستقلة. والأخيرة سهلة نسبيًا فى إنشائها. يكفى مثلاً التشويش الخفيف جدًا للحالات الأولية: وبسبب تزعزع المنظومة، يكون هناك حلان قريبان جدًا مبدئيًا يصبحان غير مترابطين تمامًا ما أن يتم الوصول إلى حد إمكانية التنبؤ.

الطاقة والطقس

يعتبر الطقس قبل كل شىء قضية طاقة. وتأتى مساهمة الطاقة على وجه الحصر تقريبًا من الشمس، التى تتوزع فى الفضاء وعبر الزمن تبعًا للحركة المدارية للأرض، ولدوران الأرض حول نفسها، ولتغيرات القوة الشمسية خلال الزمن. وتعتمد الطريقة التى تجتاز بها هذه الطاقة الشمسية الساقطة، الجو، وتخترقه لتصل إلى السطح، وتتحول إلى أنواع أخرى من الطاقة مثل الطاقة الكامنة أو الطاقة المحتملة، ثم يعاد إطلاقها نحو الفضاء عبر الجو على هيئة طاقة أشعة تحت الحمراء، على التكوين الكيميائى الفيزيائى للجو، ولدورة الماء، وللخواص الضوئية للمحيط، ولحالة الأسطح المغمورة وغطائها النباتى، وأخيرًا لانتقال الطاقة من جهة إلى أخرى فى الكوكب بواسطة تحركات الجو والمحيط. ويمكن تمثيل المنظومة فى مجملها بنوع من الآلات الحرارية الهائلة.

وليكن اهتمامنا أولاً بالقيم المتوسطة التى تحدد المناخ الأرضى. تطابق قوة الإشعاع الشمسى الراهنة تدفق ساقط من الطاقة الشمسية بقيمة ١٣٦٨ وات لكل

متر مربع تقريبًا، وإذا وزعنا هذا التدفق على مجمل السطح الأرضي (وهــو مــا يمثل ثلاث مرات مقطع أسطوانة محصورة بالأرض)، نحصل على قيمة متوسطة مقدارها ٣٤٢ وات لكل متر مربع. ومن هذا التدفق الساقط، هناك نحــو ٣٠ فــي المائة، أي ١٠٢ وات لكل متر مربع، تنعكس أو يعاد بثها نحو الفــضاء بواســطة السحب، الرذيذات (الإيروسول)، والثلوج وأجزاء السطح العاكسة أكثر من غيرها، خاصة الصحاري. ومن ثم يبقى ٢٤٠ وات لكل متر مربع وهي التي يتم في الواقع امتصاصها عن طريق المنظومة: نحو ٦٥ بواسطة الهواء، والبــاقي نحــو ١٧٥، تقوم بتسخين السطح. وحقيقة أن ثلاثة أرباع الطاقة الشمسية تقريبًا يتم امتصاصها فرضًا على مستوى السطح يؤدي بالطبع إلى أن درجة حرارة الهواء تتناقص مــع الارتفاع، لكن ظاهرة الاحتباس الحراري ترفع بشكل كبير جدًا من هذا الانخفاض في درجة الحرارة. وفي الواقع، يعيد السطح الذي تم تسخينه بالإشــعاع الشمــسي طاقته إلى الفضاء بشكل أساسي على هيئة إشعاع أشعة تحت الحمراء، التــي يــتم امتصاص جزء منها ورده إلى أسفل بحاجز ظاهرة الاحتباس الحــراري (بخــار الماء، وثاني أكسيد الكربون، والميثــان، وأكــسيد النتــروجين N_2O، والأوزون، ومركبات الهالوجين مع الكربون halocarbures) وكذلك بالسحب. وتحبس ظاهرة الاحتباس الحراري هذه أيضًا كمية كبيرة من الحرارة في الطبقات الــسفلية، التــي تساهم أيضًا في رفع درجة الحرارة. والإشعاع المحتجب بواسطة ظاهرة الاحتباس الحراري يصل مقداره إلى ١٥٥ وات لكل متر مربع: وهذه القيمة مقيــاس كلــي لظاهرة الاحتباس الحراري. وهناك مقياس آخر محتمل لظاهرة الاحتباس الحراري وهو السخونة التي تسببها للسطح: °33 مئوية، يتم حسابه على أساس الاختلاف بين متوسط درجة حرارة السطح (٢٨٨ كلفن) ودرجة حرارة الأرض منظورًا إليها من الفضاء عبر الهواء (٢٥٥ كلفن).

وتتيح لنا أجهزة قياس الإشعاع متسعة النطــاق مثــل ScaRaB (CNRS - CNES)، التي تقيس الموازنة الإشعاعية من الفضاء)، معلومات حــول التــدفقات الجلية للإشعاع الشمسي والأشعة تحت الحمراء التي يتم إشعاعها بواســطة الأرض نحو الفضاء. وتتيح لنا عمليات توحيد معطيات هذه الأجهزة بقياسات الــسطح، أن

ندرس مثلاً تغيرات ظاهرة الاحتباس الحرارى بواسطة درجة حرارة السطح، وبواسطة بخار الماء (الأكثر انتشارًا من بين غازات ظاهرة الاحتباس الحرارى) وبواسطة السحب. وتبعًا لـ ScaRaB، فإن مساهمة السحب فى ظاهرة الاحتباس الحرارى الكلى تصل إلى نحو ٣٠ وات لكل متر مربع، فى حين أنها ترفع انعكاسية الكوكب بقيمة ٤٨ وات لكل متر مربع: والتأثير الإشعاعى الصافى للسحب يمضى من ثم فى اتجاه تبريد المناخ بقيمة ١٨ وات لكل متر مربع. ويتعلق الأمر بالتأكيد هنا بقيمة متوسطة: يتغير التأثير الإشعاعى تبعًا لأنواع السحب، ويتوزع بطرائق مختلفة تبعًا للأماكن والمواسم.

وفى المتوسط فى الكرة الأرضية وخلال الزمن، تعتبر موازنة الطاقة لكوكب الأرض متوازنة تقريبًا: تشع الأرض تجاه الفضاء فى الأشعة تحت الحمراء طاقة تساوى بقدر ملموس للطاقة التى تستقبلها من الشمس. لكن من الواضح تمامًا أن هذا التوازن لا يمكن إلا أن يكون تقريبيًا، بسبب التذبذبات الدائمة - يومية وموسمية وخلافه - للمنظومة الطقسية، وأيضًا، فى الوقت الراهن، بسبب الاضطرابات الضعيفة لكن ذات الدلالة الناجمة عن النشاط الكوكبى للبشر.

دور الجو والمحيط

وفى المقابل، عند نقطة معطاة من الأرض، تكون موازنة تبادلات الطاقة مع الفضاء بعيدة عن أن تكون متوازنة. ففى دائرتى الانقلاب، تستقبل الأرض طاقة شمسية أكثر مما تبثه من أشعة تحت حمراء، والعكس فى المناطق القطبية. وفى مناطق الزيادة حيث يتغير العجز الطاقى بواسطة الفصول: يكون هناك نقص فى نصف الكرة الشتوى فى كل مكان، أى فى كل نقطة، يتم فقد طاقة تجاه الفضاء. وفى بعض مناطق الكرة الأرضية يكون النقص حتى خلال كل السنة. وهذه حالة الصحارى المجاورة لخط الاستواء مثل الصحراء الكبرى Sahara: يكون الهواء فوق الصحراء جاف بشكل خاص وبدون سحب، وظاهرة الاحتباس الحرارى فى

حدها الأدنى، مما يسبب فقدًا كبيرًا لطاقة الأشعة تحت الحمراء (من هنا تكون درجات الحرارة الليلية منخفضة جدًا)، ومن جانب آخر، فإن غياب النباتات ينتهي إلى انعكاسية كبيرة للسطح، الذي يرد نحو الفضاء من ٣٠ إلى ٤٠ في المائة من الطاقة الشمسية الساقطة. وتكون نتيجة توحد هاتان الآليتان بالنسبة للمنطقة الصحراوية مصرف طاقي يستمر طوال العام كله.

وتوزيع الموازنة الصافية، أو التدفق الصافي للطاقة بين الأرض والفضاء، يتيح لنا معلومات حول تحركات الجو والمحيط. وفي الواقع، سيكون دور هذان المائعان نقل الزيادة في الطاقة التي يتم استقبالها هنا أو هناك، نحو مناطق يسود فيها النقص. وبشكل خاص، فإن المحيط والجو ينقلان الطاقة من الشريط الاستوائي نحو خطوط العرض المتوسطة والمرتفعة، وبشكل أكثر خصوصية لجانب نصف الكرة الشتوي. وبدمج هذه التدفقات المرتبطة بخطوط الطول meridiens، في توازي وفي سمك الهواء والمحيط، فإن مقدارها يصل إلى ٥ × ١٠^{١٥} وات. ويساهم المحيط والهواء بقدر ملموس بجزء في هذه الانتقالات.

كيف يمكن للجو والمحيط أن ينقلا طاقة جهة ما على الكوكب إلى جهة أخرى؟

أول آلية هي المزج الأفقي لكتل الهواء. وهذا المزج فعّال بشكل خاص في الجو، على خطوط العرض المتوسطة وخلال الشتاء، هناك حيث تتغير درجة الحرارة بسرعة جدًا مع خط العرض. ويسبب تزعزع الجريان الجوي اضطرابات (ضغوط منخفضة يدور حولها الهواء أفقيًا تقريبًا في اتجاه عكس عقارب الساعة) مما يمزج الهواء الساخن الذي يكون رطبًا في الغالب آتيًا من المناطق المجاورة لخط الاستواء، مع الهواء البارد الجاف بالأحرى من خطوط العرض المرتفعة. وينتهي هذا التبادل إلى تدفق حرارة وطاقة كامنة (أو بخار ماء) تنتقل من المناطق المجاورة لخط الاستواء نحو خطوط العرض المرتفعة. وليس المزج بواسطة الاضطرابات فعّالاً لنقل الطاقة إلا لأنه يخلط كتل الهواء المجاورة لخط الاستواء عالية الطاقة بكتل الهواء المجاورة للقطب الأقل قدرة على المزج بكثير.

وفى القطاع الاستوائى يصبح هذا النوع من النقل غير فعّال بالمرة، لأن درجات الحرارة متماثلة جدًا على المستوى الأفقى، وهو الأمر نفسه بالنسبة لمستويات الطاقة. وسيتم نقل الطاقة بتحركات ثلاثية الأبعاد، تنتظم على هيئة لفائف، ويكون لها طاقات صعود ومناطق هبوط، مع ذهاب السائل إلى الطبقات العليا، ومناطق صعود نحو مناطق هبوط، وفى الطبقات السفلية، مناطق هبوط نحو مناطق الصعود. ولفهم كيف يمكن للالتفافات العمودية نقل الطاقة طبقًا للمستوى الأفقى، يجب أن نذكر بضع كلمات لخاصيتين مهمتين جدًا للجو والمحيط: ويتعلق الأمر بـ "التشكل على هيئة طبقات stratification" و"التوازن stabilite".

يعتبر الهواء والمحيط مائعين ذوى طبقات تقريبًا فى كل الجهات بالنسبة للكثافة والضغط ودرجة الحرارة: تتغير الكثافة والضغط ودرجة الحرارة بسرعة أكبر بكثير (بعدة مقادير كبيرة) تبعًا للاتجاه الرأسى الذى يتبع الأفقى. وأصل التشكل على هيئة طبقات فيما يخص درجة حرارة الجو، هو، فيما يبدو، سخونة السطح وظاهرة الاحتباس الحرارى، أما بخصوص المحيط، فإنه يسخن أيضًا بالسطح وتنخفض درجة الحرارة بالطبع كلما غصنا. وإنه لأمر طبيعى أنه فى كل جهة حيث تنشأ التشكلات الطبقية، فإنها تكون مستقرة أى أن المائع الخفيف يوجد فوق المائع الأكثر ثقلاً، وتكون الحركة شبه متوازنة فيما يتعلق بالموائع. ويتم إثبات أن التشكل الطبقى متوازن إذا كانت الطاقة تزداد عندما نرتفع.

وحيث إن الأمر كذلك، من الواضح أنه فى الدوران على هيئة لفائف، ينقل الرافد الأعلى طاقة عمليات صعود أكثر نحو عمليات الهبوط، بينما الرافد السفلى لا ينقل عمليات هبوط نحو عمليات الصعود. ومن ثم ستكون الموازنة الصافية نقل طاقة من عمليات الصعود نحو عمليات الهبوط، وستكون المناطق ذات الزيادات من ناحية الطاقة مناطق صعود، ومناطق حالات النقص، مناطق هبوط.

وفى الجو توجد المناطق ذات الزيادات بشكل أساسى فى المناطق الاستوائية، هناك حيث يستقبل الجو مساهمة قوية من الطاقة على السطح: على

القارات، هناك حيث تكون الشمس فى ذروتها، وفى المحيط، هناك حيث سطح الماء دافئ بشكل خاص. ولمساهمة الطاقة هذه فى الأصل تأثير مزعزِع: يصاحب عمليات الصعود تحركات حمل شديدة (ركام مزنى[٦٢] يمكن أن يصل إلى ارتفاع ٢٠ كم) تنقل الطاقة إلى أعلى وتعيد استقرار التشكل الطبقى. وتبرد طبقات الهواء الخفيفة الساخنة الرطبة التى تصعد خلال دورة الحمل هذه، وتتكثف رطوبتها وتسقط على هيئة مطر: ومرور الشمس بالذروة على القارات الاستوائية يتفق أيضًا مع موسم الأمطار أو الريح الموسمية مع الأمطار الغزيرة. ومن ثم فهذا هواء بارد وجاف يصل إلى الطبقات العليا ويتجه نحو المناطق ذات النقص فى الطاقة مثل الصحارى، حيث يهبط ثانية إلى السطح. وهكذا يساعد التصحر على ازدياد انخفاض الهواء الجاف، الذى بدوره، يساعد على التصحر. والتضاد بين مناطق الحمل والرطوبة، ومناطق الانخفاض حيث يكون الهواء جافًا يكون واضحًا بشكل خاص فى صور قناة بخار الماء فى Meteosat.

وفى المحيط يكون فقد الطاقة على السطح، على خطوط العرض المرتفعة، هو الذى يؤدى إلى خرق حالة الاستقرار ويطلق الحمل. وينتج ذلك بالأخص فى بحار النرويج ولابرادور Labrador، وبالقرب من المنطقة القطبية الجنوبية، فى بحر ويديل Weddell، حيث يغوص الماء الثقيل والبارد والمالح ويغذى دوران الأعماق، ويعتبر بخار الماء فى الجو والملح فى المحيط عاملى إعادة استقرار بالنسبة للتشكل الطبقى. وتوجد المصادر الوحيدة لبخار الماء الجوى (أو الطاقة الكامنة) على السطح: هذا هو التبخر فى المحيط، وفى أسطح الماء أو الأراضى الرطبة، أو تبخر الأغطية النباتية. ويضاف إلى ذلك أن ضغط البخار المشبع يقل أسيًا عندما تنخفض درجة الحرارة، لا يستطيع الماء البارد أن يمتص سوى القليل جدًا من بخار الماء. ومن ثم فإن الطاقة الكامنة تكون محبوسة فى المناطق

(٦٢)ركام مزنى cumulonimbus: أو صيب (كتلة من السحب العالية الضخمة تطلق وابلاً من المطر وثلجًا وعواصف. (المترجم)

الاستوائية وبخاصة فى الطبقات السفلية للجو، وهو ما يتعارض مع قانون الاستقرار. وهذا هو السبب فى أن الحمل الاستوائى يهيمن عليه الحمل الرطب. وفى المحيط، يُثقل التبخر على السطح الماء السطحى، بتحميله بالملح. وعلى خطوط العرض المرتفعة يعتبر تكون جليد البحر مصدرًا إضافيًا للملح: الملح المطرود بواسطة الجليد يُثقل ماء السطح، ويساعد على ظهور مواقد cheminees حمل، حيث يتكون الماء العميق.

وفى الهواء الاستوائى يمكن تبسيط الدوران على هيئة لفائف بطريقة مرتبطة بالمناطق تحت اسم خلية هادلى Hadley، التى تنقل طاقة ما يُطلق عليه خط استواء الأرصاد الجوية l`quateur meteorologique، إلى ما يجاور مناطق خط الاستواء لنصف الكرة الشتوى. وفيما وراء المناطق المجاورة لخط الاستواء، فإن المزج الأفقى هو الذى يحل محل نقل الطاقة نحو القطبين. ومن المهم الإشارة إلى أنه مع الصعود، إذا كانت الطاقة الكلية وبالتأكيد الطاقة الكامنة متزايدتين، تتناقص الحرارة المحسوسة والطاقة الكامنة. ومن ثم فإذا كانت الموجات الطويلة الزاخرة rouleaux تصدّر طاقة كلية لمناطق الصعود، فإنها تستورد منها فى الوقت نفسه الطاقة المحسوسة والكامنة، مشجعة بذلك الحمل وحفظ الموجات الطويلة الزاخرة rouleaux.

والمثيل فى المحيط للدورانات على هيئة موجات طويلة زاخرة فى الهواء هو الدوران ثلاثى الأبعاد المسمى بالدوران الملحى الحرار،[٦٣] لأنه يتم التحكم فيه بواسطة تغيرات الطفو الناتج عن التمدد الحرارى والملوحة. ويجرى الماء البارد والمالح الذى يغوص فى بحار النرويج ولابرادور ببطء نحو الجنوب فى عمق الأطلنطى، ويجتاز خط الاستواء ويدور حول رأس الرجاء الصالح ليصل إلى المحيط الهندى حيث يصعد جزء منه إلى السطح، ويتابع الباقى طريقه نحو الشرق

---

(٦٣) الدوران الملحى الحرارى thermohaline circulation: دوران الماء الغورى (فى البحار) بفعل تغيرات الملوحة ودرجة الحرارة. (المترجم)

ويصعد بدوره إلى السطح فى المحيط الهادى الاستوائى. وتحت تـأثير الـصتابات تشق هذه المياه السطحية بعد ذلك الطريق العكسى، وتصعد نحو شمال الأطلنطـى حيث تبرد، وتصبح محملة بالملح، ومن ثم تتثاقل، وتغـوص مـن جديـد. ودورة "البساط المحيطى النقّال tapis roulant oceanique" هذه بطيئة إلى أقصى درجة، إذ إن مدة الدورة تتراوح بين ٥٠٠ سنة و ١٠٠٠ سنة. وهى التى تسبب فى الوقت الراهن سخونة الطقس الأوروبى، وفى الواقع، على خط العرض نفسه، الأكثـر اعتدالاً فى العالم.

وهكذا يظهر لنا الجو والمحيط على أنهما الفاعلان الرئيسيان فى تـصاريف الطقس. ويلعب الحوار بين هذين الفاعلين الرئيسيين دورًا مركزيًا: تسحب الريـاح الماء السطحى فى المحيط، وفى المقابل ينقل تحرك كتل الماء كميات ضخمة مـن الحرارة التى تسخن الجو بدورها، لتعدّل كذلك نظام الرياح والتى تقوم بدورها فى سحب المحيط. وتعتبر التفـاعلات مـن هـذا النـوع، أو التفـاعلات الرجعيـة retroactons، عملة متداولة فى المنظومة الطقسية، فهى تسبب حالات التزعـزع والتذبذبات الطبيعية التى تسيطر على سلوك المنظومة.

التذبذبات الداخلية

من بين التذبذات المرتبطة بالتفاعلات محيط – جو، فإن الأكثر شهرة هـى ظاهرة تحمل اسمين النينو (لجزئها المحيطى) والتذبـذب الجنـوبى Oscillation australe (لجزئها الجوى). ولتناول آليات النينـو، يجـب أولاً الإشـارة إلـى أن الدوران الأرضى يفرض هيمنة رياح الصتابات (أى رياح الشرق) فـى المنـاطق الاستوائية: وجود الصتابات هو الذى يؤكـد أن الأرض الـصلبة تنقـل بواسـطة الاحتكاك دورانها إلى الجو. ويؤدى جذب المياه السطحية فـى المحـيط الهـادى الاستوائى نحو الغرب بواسطة الصتابات إلى تجمّع المياه الدافئة (أكثـر مـن ٣٠ درجة مئوية) فى كل الجزء الغربى، وحالات الصعود من جديد للمياه الباردة فـى المناطق المجاورة لشواطئ بيرو. ومن ثم فإن الكميات الهائلة من الطاقة المتجمعة

فى الغرب تنتقل إلى الهواء، وتغذى فيما يجاور إندونيسيا نشاط حمل شديد. وينتج عن ذلك، كما سبق أن رأينا، دوران موجة طويلة زاخرة يطلق عليها دوران ووكر Walker، مع حالات صعود فى المياه الدافئة غرب المحيط الهادى وحالات هبوط فى المياه الباردة فى الشرق. وينتهى نشوء هذا الدوران، فى فرعه المنخفض، بتقوية الصّابات. ولدينا فى ذلك مثالاً فى حالات التفاعل الرجعى التى تؤدى إلى التذبذبات الخاصة بالمنظومة. وفى فترات اشتداد الصّابات، يكون المحيط الهادى الشرقى بارداً، والحمل فى إندونيسيا شديداً جداً. وفى فترات ضعف الصّابات تتراجع كتل الماء الدافئ السطحى نحو الشرق، ويغادر الحمل إندونيسيا إلى المركز وشرق المحيط الهادى. ونجد فى هذه الحالة أن كل الدوران على هيئة موجة طويلة زاخرة من النوع الاستوائى يتم تعديله: نلاحظ حالات جفاف مأساوية فى بعض المناطق مثل إندونيسيا وأستراليا، وأمطار طوفانية على مناطق أخرى مثل بيرو. والمخطط الأكثر بساطة لهذا التذبذب هو مخطط أحادى البعد، فيه تتحدد ثوابت زمن التذبذب بالانتشار الطولى للموجات الاستوائية. والواقع أكثر تعقداً بالطبع، ويُدخل مجمل التفاعلات بين الدوران ثلاثى الأبعاد للجو والمحيط فى المناطق المجاورة للمحيط الهادى الاستوائى. ومن جانب آخر فإنه أصبح من الممكن نمذجة الظواهر جيداً بشكل كافٍ، بحيث يمكن الاقتراب من مرحلة التنبؤات التجريبية.

والنينو تذبذب يحدث كل عدة سنوات، فيما يشبه فترة تتراوح بين عامين وأربعة أعوام. ويوجد أيضاً فى المناطق الاستوائية بتذبذبات ضمن فصلية، حيث تصل هذه الفترات إلى بضعة عقود، وتتصف بانتشار ركام الحمل نحو الشرق، وغرب المحيط الهندى نحو المحيط الهادى الاستوائى. وهذه التذبذبات ترتبط هى أيضاً بالتفاعلات المحيط – الجو، وتتفاعل مع الريح الموسمية الآسيوية ذات الأمطار الغزيرة ومع النينو، الذى يضفى عليها أهمية خاصة فيما يخص الاقتصاد والمجتمع، فى المناطق حيث تخطى التعداد السكانى الراهن مليارى نسمة.

وأكثر قرباً منا، يجب أن نذكر التذبذب شمال الأطلنطى، الناتج عن تعديلات فى شدة التباين بين الضغوط المنخفضة لإيسلند والضغوط المرتفعة على جزر

الأرخبيل البرتغالى على الأطلنطى Acores. ويتعلق هذا التذبذب بشكل أكثر خصوصية بالأحوال الشتوية فى أوروبا، عندما تكون هذه المنظومات من الضغوط المرتفعة والمنخفضة نشطة بشكل خاص. وضديد الإعصار على هذه الجزر البرتغالية أكثر شدة منه فى الوضع الطبيعى المناظر لخط العواصف التى تصل إلى أوروبا الشمالية: حيث يكون الجو هناك حينئذ أكثر اعتدالاً ورطوبة، بينما يكون جافًا وباردًا بطريقة شاذة فوق أوروبا الشمالية. وبالعكس عندما يضعف ضديد الإعصار: يصل خط العواصف بالأحرى إلى أوروبا الشمالية حاملاً إليها الهواطل زيادة على ذلك.

وهناك تذبذب آخر داخلى، على مستويات زمن أطول بكثير، هو إمكانية تغيير الدوران الملحى الحرارى، ومن ثم تدفق الحرارة المحيطية وتكوّن الماء العميق فى الأطلنطى الشمالي. وتكثّف مياه السطح فى بحر النرويج وبحر لابرادور يكون حساسًا، مثلاً، لمساهمة الماء العذب عن طريق الهواطل والأنهار، أو أيضًا، عن طريق الذوبان الجزئى جليد الجبال والقطبين أو الأكسية الجليدية. وبشكل طبيعى تميل السخونة المؤقتة لخطوط العرض الشمالية المتوسطة والمرتفعة، بتنشيط الهواطل وذوبان كتل الجليد، إلى تخفيض ملوحة الأطلنطى الشمالى، ومن ثم تعمل على إضعاف الدوران الملحى الحرارى، ذلك الذى يجذب برودة من الأطلنطى الشمالى ومن المناطق القارية التى تحيط به، وأوروبا بشكل أكثر خصوصية. ولدينا هنا أيضًا مصدر تذبذبات محتملة، قد تكون تدخلت فى عدد معين من التغيرات الطقسية السريعة فى الماضى، مثل بداية واقعة إلهة الغابات الحديثة Dryas Recent، هبوط مفاجئ نحو البرودة حدث خلال بضعة عقود خلال ذوبان الجليد الأخير، منذ نحو ١٣٠٠٠ سنة، أو أحداث أخرى للتجلد الأخير المعروف باسم تذبذبات دانسجارد – أوسشجر Dansgaard - Oeschger. ويمكن أن تنتج تلك الأحداث بالطريقة نفسها عند وجود سخونة طقسية تعود إلى اضطرابات مرتبطة بالبشر فى الوقت الراهن. ويبدو أن سرعة هذه التغيرات الطقسية السريعة قد وصلت فى الماضى إلى قيم مقدارها ١٠ درجات مئوية فى ٥٠ سنة، وهذا تغير طقسى شديد على مستوى الحياة البشرية.

ومن ثم تظهر لنا المنظومة الطقسية كما لو أنها مولد تذبذبات معقد كثيرًا. ولهذا المولد للتذبذبات أنواع تذبذباته الخاصة، التى أعطينا عنها أمثلة فيما سبق، ولكنه، بالتأكيد، يتفاعل أيضًا مع التذبذبات الخارجية.

ولن ننوه إلا من باب التذكر إلى انحراف القارات الذى يغير رأسًا على عقب، على مستوى بضع عشرات الملايين من السنوات، حالات الطقس فى المناطق ويعدّل حتى الطقس العام، ومثال لذلك بأن يرفع الجبال أو أن يحد، بل بأن يلغى، احتمال تكوّن قباب جليدية. وبالنسبة لأرض، مثلاً، حيث كانت القباب القطبية الشمالية والقطبية الجنوبية محتلة بالكامل بمحيطات مفتوحة لم تعرف التجلدات دون شك، فإن التيارات المحيطية تحمل ما يكفى من الطاقة حتى القطبين.

وعلى مستويات أزمنة أقل طولاً، بضع عشرات من آلاف السنوات، فإن تغيرية الطقس لديها كمصدر رئيسى التغيرات البطيئة لتوزيع التعرض للشمس، العائد إلى عدم انتظام الحركة المدارية للأرض. وفى الواقع فإن حركة الأرض حول الشمس تختل بجاذبية الكواكب الأخرى للمجموعة الشمسية. ومن المحتمل، بالتطورات المتسلسلة، إعادة تكوين هذه الحركة بطريقة دقيقة جدًا خلال فترات زمنية تصل إلى بضعة ملايين السنين.

والتغيرات المناظرة للتعرض للشمس تكون مختلفة تمامًا بالتغير فى الزمن لثلاثة بارامترات: ***لا مركزية*** القطع الناقص، الذى يغيّر التباين بين فصل ساخن إجمالاً حيث تكون الأرض قريبة من الشمس، وموسم بارد إجمالاً عندما تكون بعيدة عن الشمس، ***ميلان*** خط الاستواء الأرضى على مدار الشمس الظاهرى بين البروج، والذى يغير التباين بين نصف الكرة الصيفى ونصف الكرة الشتوى، وفى النهاية، ***الحركة البدارية*** التى ترسم شكلاً مخروطيًا حول المحور العمودى،[٦٤]

---

(٦٤)حركة بدارية precession: حركة ترسم شكلاً مخروطيًا حول المحور العمودى. (المترجم)

التى تحدد تغير الطور بين الفصل الساخن إجمالاً والشتاء أو الصيف لأحد نصفى الكرة الأرضية أو النصفين. واللامركزية تتراوح بين صفر (دائرة كاملة) و ٠,٠٧، مع فترة زمنية ١٠٠٠٠٠ سنة. ويتراوح الميلان بين °22 مئوية و °25 مئوية، مع فترة زمنية ٤١٠٠٠ سنة. والحركة البِداريّة هى ظاهرة تتصف بمزيد من التعقد: الحركة البِدارية الفلكية هى حركة دوران لمحور القطبين على مخروط بِدارى حيث الفترة الزمنية ٢٦٠٠٠ سنة، وتُضاف إليها حركة الكَبْو،[٦٥] ولكن حتى نصل إلى ما يُطلق عليه الحركة البدارية الطقسية، أى إلى طور الفصول بطور المدار، يجب أيضًا أن نأخذ فى الحسبان دوران المدار نفسه: ومنه فترتان زمنيتان رئيسيتان ١٩٠٠٠ سنة و ٢٣٠٠٠ سنة.

ومن المقبول فى الوقت الراهن عمومًا أن التغيرات الضخمة للطقس التى سادت خلال المليونى سنة الماضية تعود إلى تلك التغيرات المدارية وإلى تغيرات التعرض للشمس التى تنتج عنها. والظواهر ذات الأثر الأكبر هى تعاقبات العصور الجليدية وما بين الدورات الجليدية، والتى يكون لها إيقاع التراكم البطئ، ثم الاختفاء النسبى السريع للقمم الجليدية الهائلة فى أمريكا الشمالية وشمال أوروبا. واستمرت الدورة الجليدية – ما بين الجليدية الأخيرة نحو ١٢٠٠٠٠ سنة.

ويكون تراكم الجليد فى القطبين بطيء دائمًا، لأن الأمر يحتاج إلى الكثير من الزمن بالنسبة للجو لكى ينقل بخار الماء بكميات كافية إلى خطوط العرض المرتفعة حيث يكون الهواء باردًا وحاملاً القليل من الرطوبة. والرجوع إلى ما بين العصور الجليدية بالتذويب أو بفقدان استقرار القمم يكون أكثر سرعة بكثير. ونحن موجودون الآن فى نهاية فترة زمنية بين عصرين جليديين بدأت منذ نحو ١٠٠٠٠ سنة. وكان أقصى العصر الجليدى الأخير، أى العصر الذى كان فيه الطقس أكثر برودة وحيث كانت القمم الجليدية قد وصلت إلى أقصى أعلى امتداد لها، قد حدث منذ نحو ٢٠٠٠٠ سنة. وفى ذلك العصر، كانت كندا وشمال الولايات المتحدة

---

(٦٥) حركة الكَبْو nutation: تمايل محور الأرض بتأثير الشمس والقمر. (المترجم)

مغطيان بأكثر من ٣,٥ كم من الجليد، وشمال أوروبا وروسيا، بأكثر من ٢ كم من الجليد. وكانت درجة الحرارة المتوسطة على الكرة الأرضية أكثر انخفاضًا منها في الوقت الراهن بما يتراوح بين ٥ و٦ درجات مئوية، وكان القطبان أكثر برودة بنحو عشر درجات. وبالقرب من العودة إلى ما بين العصور الجليدية بالضبط، منذ ٦ إلى ١٠٠٠٠ آلاف سنة، كان الطقس أكثر سخونة قليلاً مما هو عليه في الوقت الراهن: كانت الحركة البِداريّة مثل ما تكون عليه عندما كانت الأرض قريبة من الشمس خلال الصيف الشمالي (وهو العكس في الوقت الحالي): ومن ثم كانت مواسم صيف نصف الكرة الشمالي أكثر سخونة، الرياح الموسمية الإفريقية والآسيوية مع الأمطار الغزيرة أكثر شدة وكانت تنفذ أكثر إلى الشمال في القارتين: وجنوب ما يمثل اليوم الصحاري كان مخضرًا نسبيًا ومسكونًا بالحيوانات والرعاة، كما تسترجعه الرسوم الجدارية المائية في تاسيلي.[٦٦]

ونحن نسجل ما تم خلال الدورات الأربع الأخيرة للعصور الجليدية – ما بين الجليدية، أي خلال السنوات الأربعمائة أو الخمسمائة ألف الأخيرة، والموجود في تلك المحفوظات الحقيقية لتطور الطقس ألا وهو القمم الجليدية والرواسب البحرية أو البحيرية، التي نستكشفها بواسطة الاستطلاع، بعلم طبقات الأرض، بتحليل النظائر والتحليل الكيميائي. ويخبرنا محتوى الجليد، مثلاً، عن النظائر الثقيلة للأكسجين والهدروجين في تاريخ دورة الماء (اتسم حينئذ بالتبخر بتجزؤ النظائر Fractinnements isotopiques)، ومن ثم عن درجات الحرارة، والهواطل ومستوى البحار، منذ ٢٠٠٠٠ سنة، في عصر القمم الجليدية الضخمة، كان ١٢٠ مترًا تحت المستوى الراهن (كان من الممكن الذهاب على الأرض اليابسة من فرنسا إلى إنجلترا، ومن قارة آسيا حتى جاوا وجزيرة بورنيو الإندونيسية). وتتيح لنا فقاعات الهواء الرقيقة المحبوسة في الجليد أن نتعرف على

(٦٦)تاسيلي أجير Tassili de Ajjer: مجموعة جبال تتخللها أودية ضيقة شمال هوجر Hoggar، في الصحراء الجزائرية. (المترجم)

التركيب المناخي للهواء (وخاصة محتواه من غاز الاحتباس الحرارى: ثانى أكسيد الكربون والميثان) من لحظة تكوّن الجليد حتى بضع مئات الآلاف من السنوات.

وما تحكيه لنا تلك السجلات وعمليات النمذجة التى يمكن إجراؤها عن تطور الطقس خلال تلك الفترات الزمنية، هو أن المنظومة الطقسية تسلك مثل آلة تضخيم للاندفاعات المدارية، بفضل تفاعلات رجعية متعددة تعود مثلاً إلى دورة الماء: تكوّن القمم الجليدية ونمو الغطاء الثلجى، بإعادة الزيادة فى الطاقة الشمسية إلى الفضاء، وتقوى البرودة، أو أيضًا، تعود إلى ثانى أكسيد الكربون والميثان. ويعتمد محتوى هذه الغازات للنشاط البيولوجي وينخفض عند انخفاض التعرض للشمس، وبالتالى مع ضعف الاحتباس الحرارى ومن ثم برودة إضافية.

وسبب طبيعى آخر، خارجى، للتغيرات الطقسية، هو نشاط الشمس نفسها. ويتغير "المولد" الشمسى بدورات تصل إلى ٢٢ سنة، تتغير قوة الإشعاع، نفسها، تبعًا لدورات كل ١١ سنة، لأنها لا تعتمد على طابع المجال المغناطيسى. وتظهر الفترات ذات النشاط الأقصى للشمس بتكاثر البقع الشمسية (تعوضها "البقع اللامعة فى قرص الشمس" أو البقع المضيئة بالغة اللمعان). ونسجل أرصادًا كمية لتغير النشاط الشمسى منذ تأسيس مرصد باريس فى النصف الثانى من القرن السابع عشر (ظهور واختفاء عدد من البقع الشمسية، وتغيرات قطر الشمس الذى يتغير بنسبة عكسية مع نشاطها). وهكذا نعرف أن النصف الثانى من القرن السابع عشر كان فترة للنشاط الشمسى الضعيف بشكل خاص، حتى وصل إلى الاختفاء التام للبقع الشمسية خلال فترات زمنية تمتد عدة سنوات. وفى الوقت الراهن تقيس أجهزة قياس إشعاع ذات تجويف، محملة على منصات فضائية، تلك التغيرات بدقة كبيرة بالتخلص من الاضطرابات العائدة إلى الامتصاص بواسطة الجو. وفى دورة ذات ١١ سنة راهنة، تتغير قوة الإشعاع الشمسى بنحو وات لكل متر مربع (بقيمة متوسطة نحو ١٣٦٨ وات لكل متر مربع): لذلك تعتبر عمليات النمذجة هذه ضعيفة جدًا ولا تستطيع إتاحة الفرصة لتأثيرات طقسية مهمة، وبالأحرى فإن ١١

سنة تعتبر مدة قصيرة جدا لإحداث اضطراب فـــي القــصور الحـــرارى الـــذاتى للمحيط.

غير أنه من المعروف أن النشاط الشمسى يتغير بدورات أطول مـــن دورة ١١ سنة، والأكثر قصرًا هى دورة جليسبيرج Gleisberg (نحو ٨٠ سنة). ويمكن أن يكون لتلك الدورات تأثيرات طقسية أكثر قوة. ومع ذلك فإننا لا نعد أيضًا نماذج حقيقية ثلاثية الأبعاد للمولد الشمسى ولا نعرف أن نعيد بدقة كبيرة إنشاء تغيـــرات قوة الإشعاع خلال القرون الأخيرة. وتتيح نماذج مبـــسطة تقـــدير انخفـــاض قـــوة الشمس فى القرن السابع عشر، وهو عصر يقال إنه كان الأقل بالنسبة للحد الأدنى لموندر،[٦٧] بنحو ٠,٤ فى المائة، وهو ما يعطى انخفاضًا فـــى التـــدفق الشمـــسى الممتص بنحو ١ وات لكل متر مربع خلال نصف قرن على الأقل. ويبدو أن تلـــك الفترة كانت باردة بشكل خاص، مثل ما يظهر فى القنوات الجليدية فى الرســـومات المائية الهولندية، وفى السجلات الطقسية المتنوعة (خاصة علم طقـــس الأشـــجار dendroclimatologie الذى يدرس تغيرات النمو الماضـــى للأشـــجار ويربطهـــا بتغيرات درجة الحرارة وكمية أو معدل هطول المطر pluviosite). ومع ذلك لسنا متأكدين من أن البرودة المرصودة، والتى يُطلق عليها بصورة أكثر إيحاء "العصر الجليدى الصغير petit age glaciaire"، كانت ظاهرة شاملة للكرة الأرضية حقًـــا، ومن الممكن أنها كانت فى الواقع محدودة بأوروبا.

---

(٦٧) الحد الأدنى لموندر minimum de Maunder: يشير إلى الرصد فى الفترة الزمنية مـــن ١٦١٥ إلـــى ١٧١٥، عندما كانت البقع الشمسية نادرة تماما، حسب أرصاد الشمس فى تلك الفترة. وتعود التـــسمية إلى عالم الفلك أ. و. موندر E. W. Maunder، الذى اكتشف ندرة البقع الشمس خـــلال تلـــك الفتـــرة، فخلال ٣٠ سنة مثلاً رصد علماء الفلك نحو ٥٠ بقعة شمسية فقط، بينما العدد النموذجى يتراوح بـــين ٤٠ و ٥٠ ألف بقعة. (المترجم)

الاضطرابات المتعلقة بالبشر

سوف نتوسع قليلاً هنا فى النتائج الطقسية لظــاهرة الاحتبــاس الحــرارى المرتبطة بالبشر، الناجمة عن حقن الجو بمنتجات الاحتراق وبالأنــشطة الإنــسانية الأخرى: تلك التى تعتبر موضوعًا لعرض آخر فى سلــسلة المحاضــرات هــذه نفسها.[٦٨] وسوف نلاحظ فقط أنه يجب دائمًا إرجاع تلك التــأثيرات مــع ثوابتهــا الزمنية الخاصة (من بضعة عقود إلى عدة قرون) إلى نطاق التغيرات الطبيعية فى الطقس، التى تتطابق معها والتى يمكنها أن تتفاعل معها. ومثال لذلك، نتجه حاليًــا بالطبع نحو تجمد قد يزداد تدريجيًا خلال الــ ١٠٠٠٠٠ سنة القادمة. وتشير بعض الدراسات إلى أن تغير هذا التطور بواسطة السخونة الطقسية الناتجة عن البشر قــد يندثر خلال بضعة آلاف من السنوات.

فلنعد إلى الحاضر أو إلى مستقبل أكثر قربــا. ليــست ظــاهرة الاحتبــاس الحرارى، وإلى حد بعيد، هى الاضطراب الوحيد ذو الأصل البــشرى. فــالأنواع المختلفة من الاحتراق، التى تقوم باســتخدامها علــى نطــاق واســع المجتمعــات المعاصرة، تحقن أيضًا فى الجو، بكميات أكبر أو أقل، ملوثات مرئية على شــكل ذريرات صلبة أو سائلة يحملها الهواء (أوروسول)، وجزيئات صغيرة معلقة فــى الهواء، مركبة أساسًا من سناج كربون، وكربون عضوى، وثانى أكسيد كبريــت، إلخ. ولبعض تلك الجزيئات حجم يصل إلى أطــوال موجــة الإشــعاع الشمــسى. وتعترض جزءًا من هذا الإشعاع وتمنعه من الوصول إلى السطح، إما بأن تعيــده إلى الفضاء أو بامتصاصه. وفى الجو شديد التلوث، يمكن أن تكون طبقة الذريرات كثيفة بما يكفى لحجب الشمس تمامًا فى يوم صحو. وبعكــس ظــاهرة الاحتبــاس الحرارى فإن الذريرات تنزع كذلك إلى تبريد السطح، والطقس بالتالى. وحيــث إن بعض الذريرات، الذريرات الكبريتية، ممتصة للرطوبة من الهواء فإنهــا تــصبح

(٦٨) انظر المحاضرة رقم ٢٠٥ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بواسطة هيرفيه لو تــرى Herve Le Treut.

قادرة أكثر على القيام بدور نوى تكثيف: وبكميات معطاة من بخار الماء، فإن وجود كميات كبيرة من الذريرات الكبريتية تضاعف بهذه الطريقة عدد القطرات الصغيرة، وتكون تلك القطرات المتكونة أكثر صغرًا، وتتشكل من ثم على هيئة كميات أكثر ضخامة وتظل معلقة وقتًا أطول: وحجم قطرات الماء نفسها تقدم لذلك سطحًا عاكسًا أكثر اتساعًا وأكثر دوامًا. وظاهرة التبريد الإضافية هذه يُطلق عليها التأثير غير المباشر للذريرات الكبريتية.

وبعكس غازات ظاهرة الاحتباس الحرارى، يكون للذريرات مدة بقاء قصيرة. وتلك التى تكون مدة بقائها أكثر طولاً هى ذريرات الجزء الأعلى من الغلاف الجوى (الستراتوسفير) الطبيعية، ويتم حقنها فى هذا الجزء من الغلاف الجوى بواسطة الثورات البركانية الاستوائية مثل تلك الحديثة، الشيشون El Chichon أو ليه بيناتوبو Le Pinatubo: وتترسب ببطء ولا يتجاوز دورها فى التبريد سنتين أو ثلاث سنوات. ومن الناحية الأساسية تظل الذريرات التى ترفعها الرياح فى الصحارى، والذريرات ذات المصدر البشرى فى الطبقات السفلية، ويتم غسل الجزء الأكبر منها (خاصة الذريرات الكبريتية) بسرعة بواسطة الأمطار. وتصل مدة بقائها إلى نحو أسبوع، ولسحاباتها انتشار محدود، بعكس ثانى أكسيد الكربون، مثلاً، الذى يمتزج جيدًا فى مجمل الهواء. غير أنه يمكن لهذه السحابات أن تؤثر بصورة ملحوظة على حالات الطقس المحلية. وخلال شتاء ١٩٩٩، درست شركة إندوكس INDOEX السحابة الناشئة فى الهند وجنوب آسيا، والتى انتشرت، بعد أن دفعتها الريح الشمالية الشرقية، من ديسمبر إلى مارس على كل شمال المحيط الهندى حتى خط منظومات الحمل العظيمة الواقعة بين ٥ و 10° جنوبًا، حيث تم غسل أغلبها. والتباين مثير للانتباه، بين الجو شديد التلوث على شمال خط الحمل هذا، والجو شديد النقاء الواقع فى الجنوب. وأشارت إندوكس إلى أن تلك التلوثات المحلية تغيّر بشدة التوازن الإشعاعى على السطح، وينتج عن ذلك حالات نقص فى طاقة سطح البحر بمقدار يصل إلى نحو عشرين وات لكل متر مربع، مما يؤدى على اضطرابات ملحوظة فى التفاعل المحيط - الجو، وخاصة

حالات نقص التبخر التى يمكن أن تؤثر على الهواطل فى جهات بعيدة جدًا. وأشارت بعض الدراسات إلى أنه بالمثل، خلال الصيف، يؤثر التلوث المبثوث بالقرب من القارة في الهند، بشكل سلبى على هواطل الريح الموسمية ذات الأمطار الغزيرة، لأنه يحد من الانتشار الطاقى على السطح الذى يعتبر المحرك الفعلى لموسم الأمطار. والواضح أن المشكلة تتمثل فى أن التلوث، مثله مثل ظاهرة الاحتباس الحرارى، يرتبط مباشرة بالتطور وبالانفجار السكانى. وليس أمام التأثيرات الطقسية التى تدرسها إندوكس سوى أن تزداد بشدة فى العقود المقبلة، حتى لو تم البدء فى استخدام مقاييس مضادة للتلوث.

وفى النهاية لا يمكن أن نتحدث عن الاضطرابات الطقسية المرتبطة بالنشاط الإنسانى بدون ذكر، ولو على الأقل بشكل مختصر، تغير مناخ الساحل.[٦٩] وشهدت السبعينيات انخفاضًا كارثيًا فى الهواطل فى القطاع الساحلى. ويعود هذا التغير على الأرجح، وبشكل جزئى، إلى أسباب طبيعية، وجزئيًا إلى أسباب بشرية.

ويمكن إرجاع الأسباب الطبيعية إلى التفاعلات المحيط - الجو. ولقد رأينا كيف أن الهواطل الاستوائية (مواسم الأمطار) كانت مرتبطة بالروافد الصاعدة لدورانات الموجات الطويلة الزاخرة. وتظهر تلك الدورانات فوق القارات، هناك حيث تكون الطاقة الشمسية التى يتم استقبالها فى حدودها القصوى، وفوق المحيطات، هناك حيث درجة حرارة البحر تكون مرتفعة بشكل خاص. ونعرف أن تلك الآليتين يمكن أن تتداخلا، وأن شذوذ الماء الدافئ فى المحيط، عندما يسبب حالات صعود جديدة وحالات هبوط جديدة، يمكنه أن يقوى أو يحد من حالات الصعود القارية. وهذا هو الذى يحدث مع النينو، الذى ينتج عنه حالات جفاف فى إندونيسيا، وأستراليا، وموزبيق وشمال شرقى البرازيل، وكذلك رياح موسمية ذات

(٦٩) الساحل Sahel: اسم يشير فى الوقت نفسه إلى المنطقة القريبة من شواطئ الجزائر وتونس، وخاصة، فى الوقت الراهن، منطقة الانتقال من الصحارى إلى المناطق الاستوائية الرطبة التى تعانى من كوارث الجفاف. (المترجم)

أمطار غزيرة تكون ضعيفة على الهند. وبالمثل هناك ارتباطات قوية بين بعض شذوذات درجة حرارة المحيط، وحالات الجفاف الساحلية. ويعنى ذلك أن المنطقة القارية، حيث تكون الأمطار مرتبط أكثر بدرجات حرارة المحيط، تشبه إلى درجة كبيرة شمال شرقى البرازيل، والتى تتأثر فى الوقت نفسه، بتذبذبات النينو – النينا فى الغرب، وبالتذبذبات الشمالية الجنوبية بدرجات حرارة الأطلنطى الاستوائى فى الشرق. وتحاكى نماذج الدوران العام للجو بشكل جيد جدًا هذا النوع من العلاقات.

ولكن بالعودة إلى الساحل، يبدو أن السلوك البشرى يلعب أيضًا دوره. فتدمير النباتات من خلال المغالاة فى استغلال المراعى يؤدى إلى زيادة انعكاسية السطح، ومن ثم إلى امتصاص أقل للطاقة الشمسية. لذلك، كما سبق أن وضحنا، يحدث هنا أيضًا إضعاف لموسم الأمطار، مما يعزز النزوع إلى التصحر: ونجد هنا أيضًا أحد ردود الفعل العكسية تلك التى تجعل المنظومة الطقسية بهذه الحساسية تجاه الاضطرابات الخارجية. وبطريقة أكثر عمومية، من الواضح أن تطور حضاراتنا صاحبه دائمًا تدمير كثيف للغابات مرتبط بالممارسات الزراعية، وبالملاحة أو الإنشاءات: فى العصور القديمة كل نطاق البحر المتوسط، وفى العصور الوسطى أوروبا، وفى القرن الماضى أمريكا الشمالية، والهند أيضًا خلال القرون الماضية، وفى الوقت الراهن مجمل الغابات الاستوائية، من إندونيسيا إلى الأمازون مرورًا بإفريقيا. ومن المؤكد أن التغير المناخى لم يكن عديم التأثر بكل تلك الاضطرابات.

الباب السادس

من الجسيمات إلى المادة المضادة: المادة وتركيبها

المعرفة الفيزيائية هل لها حدود ؟[1]

بقلم: جون مارك لفى-لو بلان
Jean Marc LEVY-LEBLOND

ترجمة: د. هدى أبوشادى

لم يكن من الغريب في هذا العدد من سلسلة محاضرات جامعة كل المعارف أن نخص علم الفيزياء بسؤالنا عن حدود المعرفة. وهذا بلا شك يرجع إلى الحالة الضمنية التى ينفرد بها علم الفيزياء عن بقية العلوم.

ومنذ مشارف القرن العشرين فرض علينا علم الفيزياء الإحساس بأنه "لابد أن يشعر الإنسان بالإذلال أمام الطبيعة لأن الدقة التى يحاول بها دراستها تقف عند حدود جوهرية. هكذا يختم المعجم البريطانى (Encyclopaedia Britannica) شرحه لمبدأ اللايقين لهايزنبرج (Heisenberg). والحق يقال فى أن تطور نظرية الكم فتح الباب لفروض عديدة عن هذا الموضوع؛ منها استحالة القياس المتوازى لكل من الموضع والسرعة للجسيمات، مما يؤكد تواضع إمكانياتنا البحث فى البحث عن المعرفة. الطبيعة نفسها ترفض أن تتكشف لنا، وعلومنا الأكثر تقدما سوف تصل إلى حدود المستحيل. ونرى هذا جليا فى عدم استطاعتنا تخطى سرعة الضوء، كما أثبت آينشتين Einstein، بالرجوع للوراء بضعة عشرات من السنين، نرى كيف كانت الرؤيا التى تبنتها بعض الآراء (النسبية/ مبدأ اللايقين) قاصرة وكيف تتبدد اليوم وتفقد بريقها.

وبعيدا عن فرض حدود على نطاق معرفتنا، سمحت هذه الاكتشافات خلافا لما قد نعتقده بتطور مداركنا عن طريق إعادة توجيه المفاهيم والتساؤلات. لقد بينت عدم مطابقة النظريات السابقة للواقع.

---

(١) نص المحاضرة رقم ٢٠٨ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٦ يوليو ٢٠٠٠.

ولو أننا سئلنا ماذا حدث على الشمس منذ دقيقتين؟ وأين الإلكترون الآن وما سرعته؟

أسئلة ليس لها إجابة، لأنه لم يتم تنقيحها. وبالطريقة نفسها، يمكن أن نسأل، ماذا يوجد على سطح الأرض على بعد ٣٠٠٠٠ كم من جنوب باريس؟ هل يصبح السؤال باطلاً لأن الأرض مستديرة ومحيطها ٤٠٠٠٠كم، هل سنقول حينئذ إن هذا الاكتشاف يضع حدودًا على علم الجغرافيا؟

لم تصب الطفرات النظرية لفيزياء القرن العشرين سقفا على معلوماتنا العلمية، بل بالعكس، فتحت آفاقا جديدة. والدليل على هذا التعمق المتميز والتمكن الإدراكى والمادى للعالم الكمى. ومع ذلك يتبقى الإصرار على المفهوم السلبى والكنايات المُساء استعمالها (فى مقالة حديثة لمجلة لوموند (Le Monde) عن "السياسة الكمية" لشيراك (Jacques Chirac) مما يوضح حقا الحدود الفعلية لمفاهيمنا ولنا عودة.

خلال الحقبة الماضية ترك الإنهزام موقعه لنصر ساذج، من خلاله ظننا أن الفيزياء لن تلاقى أى عائق وسنتوصل إلى معرفة شاملة عن الكون، وسنطوع الواقع إلى عدة قوانين أساسية أوشكنا على اكتشافها، كان هذا الحلم (الوهم) "النظرية الكاملة" أو بالأحرى "نظرية كل شيء".

ستواجه المعرفة الفيزيائية حينئذ حدودها الفعلية ذات الطبيعة المتناهية، وعما قريب تلامس تخومها حتى تُستنفد فى نجاحها.

ولنا تحفظ أولى على هذا المنظور الذى اتبعه فيزيائيون مرموقون وتكرر مرات عديدة. سابقا، اعتقد نيوتن أنه وضع النظرية الكاملة "الجاذبية" وظن أنها قادرة على شرح كل الظواهر الفيزيائية ولكن تطور نظرية الكهرومغناطيسية دحض هذا الادعاء.

وفى نهاية القرن التاسع عشر، ظن لورد كلفن (Lord Kelvin) أن النظريات الفيزيائية انتهت تقريبا، بالكاد قبل أن تُكتشف التفاعلات النووية. ومنذ

ذلك الوقت تقريبا، أى حوالى نصف قرن والفيزياء لم تنتج أى نظرية جذرية جديدة تستطيع أن تُغلق ملف القوى الجوهرية للطبيعة.

ناهيك عن أن الإعجاب بالذات للفيزيائيين الأوائل أدى إلى رؤية فقيرة للواقع، فتنوع أنماط تركيب المادة وثراء السلوك الذى تنتهجه المواد فى الطبيعة يزيد الهوة بين التصور العام والمفهوم المفصل للأحداث. ويظل عدد الظواهر المادية غير المفهومة كاملا فى تزايد؛ فمن الجديد نذكر مثلاً المواد فائقة التوصيل عند درجات عالية، ومن القديم نذكر طفو الثلج فوق سطح الماء بينما نظرية الكم التى يقعون تحت مظلتها مفهومة. وإن كان هناك درس لابد أن نستوعبه من القرن العشرين فهو إخفاق الاختزال الساذج للمعرفة النظرية، تلك المعرفة التى تم تأسيسها على الشواهد ومن ثم النظرية الشاملة لكل شىء لن تكون نظرية كل شىء والمنهج الذى يعتمد على تحويل كل مرئى صعب إلى غير مرئى سهل (عن كلمات فرانسيس بيرين Francis Perrin) لن يدعى الشمولية لأن غير المرئى من الممكن أن يكون صعبا. ولن ننحنى للطرق المختبرة فى الفيزياء والتجريب المنتج والصياغة الجبرية المعقدة، هذا يعنى وبقوة أن الفيزياء تلاقى فعلا حدوداً لها، ألا وهى حدود العولمة والتى ينبغى أن نترك عندها المجال للعلوم الأخرى. وينبغى أن لا يتجمد العلم عند معايير عامة. وبالرغم من ادعاء الفيزياء إدارة جموع المعارف العلمية ولكن لا يمنعها قدمها أو دقتها من الاعتراف باستقلالية الفروع العلمية الأخرى وسيادتها.

إننا لا يمكن أن نتشبث بوجهة نظر تعتمد على صياغة أساسيات الطبيعة (epistemology) والتى تعتبر مسألة حدود المعرفة عبارة عن مواجهة بحتة بين الطبيعة والعقل. هذا العقل الذى يمتلكه بشر يعيشون فى مجتمعات خاصة تصنع الهيكل الذى تنتج فيه وسائل المعرفة. عزيمة تبيح وتفرض فى الوقت نفسه البحث عن المعرفة. وفى بعض الأحيان كان هذا مجرد تصور فكرى جوهرى كما يظهر هذا بوضوح فى دور المسيحية فى التطور العلمى فى القرن السابع عشر؛ دور سلبى (موضوع جاليليو) وفى الوقت نفسه إيجابى (كفكرة الكتاب الأكبر الذى يصف الطبيعة ويعتمد على ثقافة كاتبيه).

واليوم يسوسنا الاقتصاد، مما أخضع النجاح العلمي للفيزياء في القرن العشرين (الإلكترونيات والوقود النووى،......) إلى برامج قصيرة المدى لمصلحة مشاريع متضاربة. وفي الوقت نفسه الصناعة التي خصبتها العلوم الحديثة التي تفيض في أحضان الصناعة، مما يقودنا إلى العلوم الكبرى التي تصل إلى حد الضخامة.

مثلا نسبة الدخل القومي المكرس للأبحاث الأولية يصل إلى حده الأقصى لأول مرة منذ أربعة قرون من العلوم الحديثة. وكان هجر الولايات المتحدة فكرة إنشاء معمل عملاق للجزيئات منذ عشر سنوات السبب في إعطاء الإشارة لبدء هذه الحقبة. والتردد السياسي أمام المشاريع ذات المعدات العلمية الباهظة التكاليف (راجع الخلاف حول السينكروترون سولي Synchrotron SOLEIL) أصبح القاعدة المتبعة بسبب ميزانيات البحث العلمي الضخمة التي تصل إلى مليارات الدولارات. نستطيع أن نقول الآن إن المعرفة الفيزيائية في بعض قطاعاتها الأكثر احتراما تلاقي حدوذا لتقبلها اجتماعيا، كأبحاث الهيجزبوزون (Higgs boson) هل هو موجود فعلا، وفي عقل من؟ هذا المفهوم يشكل علاقة مهمة بين التكلفة والربح حيث ينبغي أن تبرر الفاتورة الباهظة بنتائج ملموسة. واعتمد ذلك على الادعاء بأن تأجيل بعض المشاريع لبعض الوقت لا يعيق تقدم الإنسانية. حتى المشاريع الإنسانية العملاقة أصيبت بتوقف في أدق أوقات تطورها. فأهرامات الدولة الفرعونية، وكاتدرائيات أوروبا الجوطية تركت لنا آثار مشاريع أقل تواضعا ولكنها خصبة. ويتضح هذا في تأخر الإنتاج الفيزيائي في بعض المواضيع مثل الاضطراب الدوامي (turbulence) والمادة الرخوة. ونتفهم جيدا مرارة أحاسيس الباحثين أمام الصعوبات التي تقف أمامهم مما يثبط عزيمة أكثرهم طموحا. وهكذا أصيبت المعرفة بالتهدم عندما اختلطت بالتربح. أضرت هذه الظاهرة العلوم الأخرى أسرع من الفيزياء، مثل علوم الحياة بالذات. ويسمح القدم النسبي للفيزياء لنا بدراستها بشفافية أكثر من بقية العلوم، كأفضلية سيدة متوسطة العمر أرستقراطية على فتاة صغيرة برجوازية.

وتسببت الصياغة النظرية الصعبة للعلم لحد ما فى هيمنة الاقتصاد والسياسة وتحجيم العلم لأنه إذا كان مسموحا لنا بالتساؤل عن حدود المعرفة فلا بد أن نعرف معنى المعرفة. وتنوع هذا المفهوم يمزقه إلى مفهوم مختزل بين معرفة موضوعية وبخاصة (قيمة سرعة الضوء وجدول مندلييف (Mendeleïev) ومفهوم أكبر ينم عن معرفة عميقة وقوية (التعرف على أهمية سرعة الضوء للزمكان وعلاقة جدول مندلييف بنظرية الكم للذرة).

من المهم إذن أن نرى أن الفيزياء لاقت عدم تزامن لا بأس به بين اكتشافاتها والتمكن الإدراكى من هذه الاكتشافات. وأصبحت أشباه التناقضات والصياغة النظرية غير المكتملة تطاردها.

هذا الخطأ الإدراكى تسببت فيه المواضيع المعقدة وعدم تزامن فهم النظرية مع وقت وضعها. إن نضوج النظريات المعقدة كان أسرع من مقدراتنا على فهمها، كما قال ماكسويل (Maxwell) منذ أكثر من قرن من الزمان "أن معادلاتنا أكثر ذكاء منا". وهنا تظهر الضربة العكسية لسيطرة التقنية على العلم وبسبب تجزىء العمل الذى أصبح يتنامى بدون التحدث عن ضغوطه المنتجة لمنظومته الاجتماعية. ومن المحتمل أن يكون قصور معرفتنا بالمعنى الأكثر نبلا والمنطلق الطموح يعيق تقدم العلوم الفيزيائية. هذه الإعاقة تظهر جليا فى المجتمعات العلمية فما بالك فى المجتمع على وجه العموم؟

كيف ننمى ثقافتنا العلمية إذا كان ممارسوها يعانون من ضعف حاد فى فهمها؟ وهل بفضل الفتوحات الثقافية يمكن أن يصبح العلم يوما ما موضوعا للمناظرة الديمقراطية لأهميته فى حياتنا اليومية؟ وهل البحث عن حدود المعرفة العلمية يستلزم الاعتراف بحدود العلم نفسه؟

مراجع:

- Lévy-Leblond (J.-M.), *Aux contraires (l'exercice de la pensée et la pratique de la science)*, Gallimard, 1996.
- Lévy-Leblond (J.-M.), *Impasciences*, Bayard, 2000.

ما الجسيمات الأولية[٢]

بقلم: أندريه نوفو

André NEVEU

ترجمة: د. هدى أبوشادى

مقدمة

بطريقة علمية جدا يمكن أن نصف الجسيمات الأولية على أنها مكونات المادة أو (الأشعة) التى لا نراها وهى الأخرى مكونة من مواد أولية.

هذا مفهوم معقد أو أولى، سنأخذه فى وقت ما كما هو ثم نعيد صياغته فيما بعد ونوضحه.

الأكثر عمقا فى هذا المنطوق، وأن كل خطوة للبحث مصاحبة بشرح أو بحث يدلنا على الطريقة التى تتفاعل بها هذه الجسيمات لتولد كيانًا معقدًا ذا صفات جديدة. ومن ثم نحصل على بناء نظرى يعتمد على الرياضيات المجردة التى تجعلها أكثر تعقيدا ولكنها تسهم فى تطور فهمها.

وأثناء البحث عن البناء النظرى المتكامل قد تظهر مشاكل أخرى تؤدى إلى التنبؤ بجسيمات أخرى لم يتم اكتشافها. وهذا التسابق بين النظرية والتجربة تحفز كلتاهما الأخرى، وهو حافز موجود فى مواضيع أخرى للفيزياء. وهكذا هى حياة البحث، ففى البنية التى حققت كانت المسببات تحفزنا وكنا نحفزها.

---

(٢) نص المحاضرة رقم ٢٠٩ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٧ يوليو ٢٠٠٠.

أين نحن الآن ؟

انتقال وقتى إلى عالم فى منتهى الصغر

كما نعلم، فإن علمى الكيمياء والفيزياء يعتمدان على اللعبة اللانهائية بين الجزيئات (Molecules) المكونة للذرة. تصور العلماء فى بداية تاريخ النظرية العلمية أن الجزيئات هى الأجسام الأولية. وللآن عندما نتحدث عن العناصر الكيميائية الأولية بالنسبة للكيمياء والأحياء، فإننا نذكر الأكسچين، والهيدروچين، والكربون،...إلخ. أما أبعاد الذرة فهى فى حدود واحد على مليار من المتر.

نعلم منذ مطلع القرن الماضى أن كل ذرة مكونة من نواة مائة ألف مرة أصغر منها ويدور حول هذه النواة الإلكترونات. أما النواة نفسها فمكونة من بروتونات ونيوترونات مرتبطة ببعضها البعض عن طريق قوة نووية تتراوح من ألف إلى عشرة آلاف مرة أكبر من القوى الإلكتروستاتيكية التى تربط النواة بالإلكترونات. وظلت الإلكترونات جسيمات أولية منذ اكتشافها منذ حوالى أربعين عاما. أما البروتونات والنيوترونات فتتكون من كواركات (Quarks) يربطها ببعضها البعض قوى تفاعلية قوية (Interaction) بدرجة تجعل من المستحيل أن نلاحظ كواركًا منعزلاً. فى خلال هذه الحملة الاستكشافية، وعن طريق الاستعانة بالمعجلات الكبرى مثل معجلات CERN، تم اكتشاف جسيمات أخرى مثل النيوترون (Neutron) ومثائل الإلكترونات الثقيلة كالميوون (Muon) والليبتون (Lepton) وأنواع مختلفة من الكوارك معظمها لها دورة حياة قصيرة للغاية، ولها سرعة مثل سرعة الضوء، مما يجعلها تترك أثرًا صغيرًا جدا - بالكاد بعض ملليمترات - فى وسائل الكشف (Detector) وكذلك الجسيمات المضادة المناسبة.

quarks		u	c	t	force forte : gluons
		d	s	b	force électrofaible : γ, W^+, W^-, Z^0
leptons	neutrinos	ν_e	ν_μ	ν_τ	force gravitationnelle : graviton
	chargés	e	μ	τ	

Trois familles de matière — Vecteurs des forces

الشكل (١)

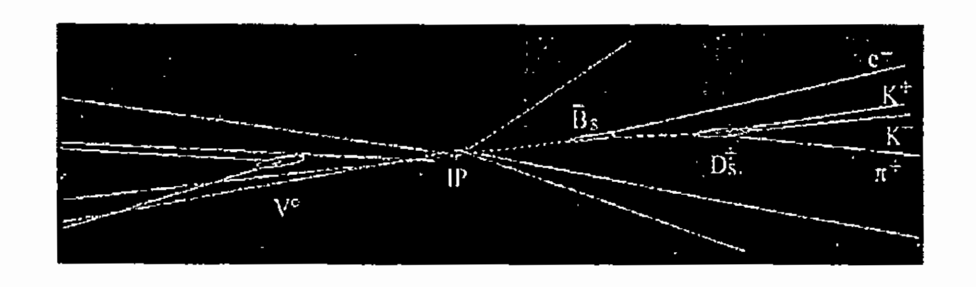
الجسيمات الأولية المعروفة. من اليسار العائلات الثلاثة للفرميونات (كوارك ولبيتون). كل كوارك يتواجد فى ثلاثة ألوان: أخضر، وأحمر، وأزرق. وكل ليبتون يصاحبه نيوترينو مضاد. إلى اليمين متجهات القوى؛ الجلوون، الفوتون، البوزونات

الشكل (١) يمثل مجموعة الجسيمات المعلومة والمصنفة على أنها أولية، كوارك (Quark)، ليبتون (Lepton) ومتجهات القوى بينها. وبينما نستطيع أن نشاهد جسيمات الليبتون منعزلة، فالكوارك لا يظهر إلا مجتمعا (Combination) غير ملون مثل البروتون يتكون من ثلاث كواركات.(٢فوق up وواحد تحت down) أو واحد من كل لون (لكنها لا تمت بأى من الأحوال بصلة إلى الألوان الطبيعية) أخضر، وأزرق، وأحمر لكى تكون المجموعة غير ملونة. وجسيمات أخرى كالبيون (Pion Π) والكاوون (Kaon K) مثلا مكونة من كوارك وكوارك مضاد... ألخ وذلك بالتشابه مع تكوين الجزيئات فى الكيمياء بدأ بالذرة.

لكى يستطيع القارئ أن يتخيل ما يحدث وعظمة الأجهزه التى تستخدم للكشف عنها أحثكم على زيارة الموقع الإلكترونى http//www.cern.ch.[٣] نلاحظ أن العلامة $\overline{K}$ فوق مسمى الجسيم تمثل الجسيم المضاد.

---

(٣) Cern (centre europien de recherche nucleaire).



الشكل (٢)

حدث رصد فى حلقات تصادم الإلكترون - بوزيترون LEP فى تجربة

الشكل (٢) هو مثال ضئيل لما يمكن أن نشاهده بالألوان فى هذا الموقع الإلكترونى نتيجة عملية حصلنا عليها من الكاشف آلف ALEPH لتصادمات الإلكترون - بوزيترون فى LEP وحزمة الإلكترونات والبوزيترونات تصل عمودية على الرسم من الأمام والخلف فى نقطة التفاعل التبادلى IP حيث ينتج بوزون (boson) (مدة حياته قصيرة جدا. ثم يتحلل البوزون إلى زوجين من الكواركات - والكواركات المضادة، وبسرعة يصاحبهما ولادة أزواج أخرى تترك آثارًا واضحة حول النقطة IP وآثارًا غير مرئية لأنها ليس لها شحنة (حيادية). وهذه الجزيئات غير المرئية سرعان ما تتحلل هى الأخرى لتعطى أخرى مشحونة (بايون Π[٤]، كاوون K[٥]، وإلكترونات) نستطيع أن نرصد آثارها.

عند حساب أطوال آثار الجسيمات وطاقاتها ونواتج التحلل ونوعيتها، نستطيع أن نتعرف على طبيعة الكوارك التى نتجت عن التصادم فى النقطة IP والميزونات التى كُونت.

هذا الرسم هو أبلغ دليل على التنافس المتبادل بين التجارب العلمية والنظريات، إذًا لابد أن نعرف جيدا نوع الحدث الذى نبحث عنه، ونحلل النتائج

(٤) عائلة من الجسيمات الأولية.

(٥) عائلة من الجسيمات الأولية.

تحليلاً دقيقًا وإلا أصبح الموضوع كمن يبحث عن إبرة فى كومة قش. وفى آخر الأمر فإن الحواسب الآلية التى تستخدم فى التحليل تتخلص أولا بأول من الأحداث التى ليس لها أهمية فى موضوع البحث.

ومن المثير للأهمية أن نوضح أن عددا كبيرا من الجسيمات فى الرسم (١) تم التنبؤ بوجودها نظريا، ثم تم الكشف عنها عمليا لأول مرة منذ ست سنوات ككوارك القمة t (top) وكوارك القاع b (bottom) وفى حدود معينة البوزونات W, Zو السحر C (Charm).

وكما تمت تسمية الألوان الثلاثة، تنسب أسماء كثير من هذه الجسيمات إلى فكاهة الدارسين. وبعد التعرف على جدول الجسيمات ينبغى لنا أن نتحدث عن تفاعلاتها التبادلية، لأنها لو لم تتفاعل لما استطعنا أن نكتشفها وفى الوقت نفسه، عن طريق تفاعلاتها " يعنى تصرفاتها" نستطيع أن نتنبأ بأخرى عن طريق النظرية ونستطيع أيضا أن نفهم سبب هذا العدد بالذات وسلوك كل على حدة. باختصار نطرح السؤال" لماذا" عن كل شىء (وهو طموح مرهون بتواضع الأحوال والإمكانيات) وسوف نقوم لاحقا بشرح ما تحدثنا عنه.

الفهم
التماثل والديناميكا
نظرية المجال الكمية

هنا تصبح الأشياء أكثر صعوبة. تعلمون جيدا أن الإلكترونات السالبة تدور حول النواة المشحونة شحنة موجبة وأن هناك تجاذبًا كهروستاتيكيا بينهما.

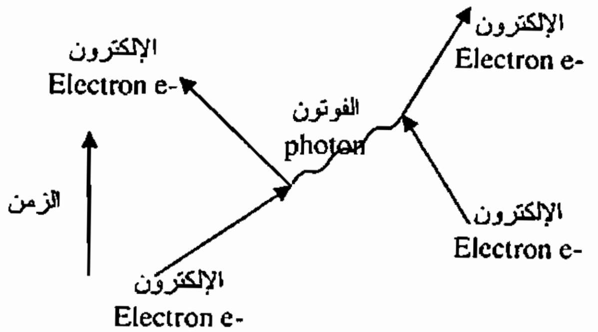
هذا المفهوم للقوى (التجاذب وحدوثه) عن بعد ليس مفهوما متطابقا كليا مع النسبية الخاصة مثلاً القوة الخطية للتجاذب الكهروستاتيكى بين شحنة موجبة وأخرى سالبة، لحظيًا بالنسبة لمشاهد ما، لن تكون بالمثل لمشاهد يتحرك.

مثلا بالنسبة للقوى الكهروستاتيكية أو المغناطيسية، يجب التعـويض عـن مفهوم القوة بمفهوم تبادل الفوتونات (Photons) كما هو مبين بالرسم (3a).

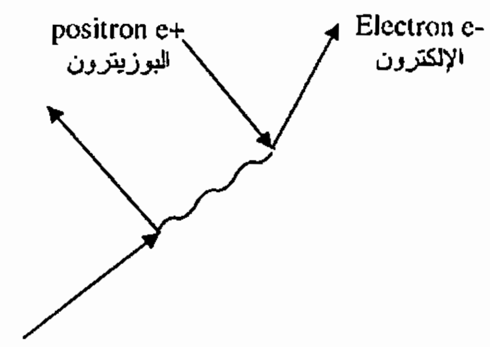
هذا الرسم يوضح التفاعل بين اثنين من الإلكترونات عـن طريـق تبـادل فوتون. ويمكن أيضًا أن يصف القوى الكهروستاتيكية بين زوج من الإلكترونـات: واحد بداخل ذرة حيث يتم بث فوتون عن طريق إلكترون ثم يمتص هذا الفوتـون فيما بعد عن طريق إلكترون آخر لجزىء الرودوبسين فى عدسـة العـين، الـذى يصبح بدوره مستثارًا ويرسل هذه الإثارة بدوره إلى المخ.

وهكذا نستطيع إحلال القوة الكهرومغناطيسية عن بعد بعملية بث وامتصاص الفوتونات (Photons).

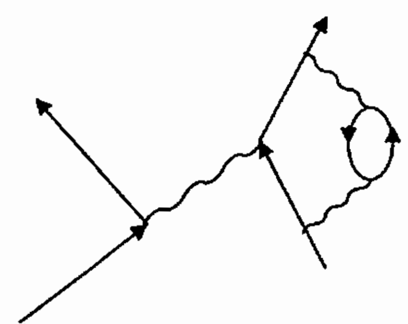
ما بين البث والامتصاص، تتحرك الفوتونات والإلكترونات فى خط مـستقيم (لم تبين بعد الصفة الموجبة للفوتونات لتميزه عن الإلكترون) عندئذ يمكن أن نعتبر الفوتون متجه القوى الكهرومغناطيسية.



الشكل (٣- أ) انتشر اثنان من الإلكترونات عن طريق تبادل فوتون



الشكل (٣- ب) تكوين زوج من الإلكترون بوزيترون



الشكل (٣- ج) إصلاح للعملية (٣- أ)

الشكل (٣)

يمثل الرسم التوضيحى لفاينمان

(Feynman diagram)

أما المتجهات الأخرى الموجودة فى الرسم (٣) هى الجلوونات (g (Gluons متجهات التفاعلات التبادليـــة القويـــة بـــين الكواركـــات (Quarks) والبوزونـــات (Bosons) W،Z متجهات التفاعلات التبادلية الضعيفة المـــسئولة عـــن الإشـــعاع النووى بيتا B والجرافيتون المتجه المسئول عن أقدم القوى المعروفة فى الكون ألا وهى الجاذبية.

لاحظ أنه من الممكن أن ندير الرسم (٣- أ) °90، وهكذا يشير إلى تكـــوين زوج من الإليكترون – الإليكترون المضاد (أو بوزيترون) مصحوب بتحلـــل هـــذا الفوتون إلى زوج آخر.

أما إذا استبدلنا الفوتون ببوزون Z، يتحلـــل الأخيـــر إلـــى زوجـــين مـــن الكواركات – الكواركات المضادة (بدلاً من إلكترون – إلكترون مضاد) ونحـــصل بالضبط على الحدث الرئيسى فى الرسم (٣- أ) الرسم (٣ – ب) يشرح حدث آخر يتحلل فيه الفوتون γ إلى زوجين من الإليكترون – بـــوزيترون. ونعيـــد صـــياغة الشرح إلى الآتى: عند التحلل B النيوترون يتحول كوارك "تحت" d إلـــى كـــوارك "فوق" u وينبعث بوزون W. ثم يتحلل البوزون W هو الآخر إلى زوجـــين مـــن الإليكترون – والنيوترون المضادة وتسمى الرســـومات (٣) الرســـم التوضـــيحى لفاينمان تبعًا لمبتكرها Feynman.[٦]

هذه الرسومات تشير إلى ما يحدث فى الحقيقة. ولا بد أن نوضح جليًا أنهـــا ليست إلا شرحًا للتفاعلات التبادلية بين الجسيمات.

كما أن الرسومات تضع قواعد لحساب الاحتمالات لهذه الأحداث مـــع دقـــة اختيارية إذا أخذنا فى الاعتبار عددًا كافيًا من الرسوم التوضيحية، فمـــثلا الرســـم (٣–ج) هو تصحيح للرسم (٣–ا) – حيث تم وضع مرحلة انتقالية فـــى الوســـطين

---

(٦) واحد من أشهر علماء الفيزياء وله سلسلة محاضرات عن الفيزياء من أفضل ما كتـــب للقـــارئ غيـــر المتخصص.

لزوج من الإليكترون - بوزيترون، مما يؤثر طفيفا على خواص الامتصاص للخط الأيمن المبين للفوتون المنبعث بالخط الأيسر.

هذه القواعد نصت عليها نظرية المجال الكمية وهو إطار فكـرى وعملـى يمزج نظرية الكم بنظرية النسبية الخاصة. استغرقت هذه النظرية أربعـين عامـا لبنائها حتى أصبحت رسوم فاينمان الهندسية لها معنى كالرسـم (٣ـــ ج). هـذه النظرية ساعدت أيضا على التنبؤ بوجود جسيمات أخرى لم يكن قد تم الكشف عنها مثل الكوارك t و c و b والنيوترينو U، كما أشارت النظرية أيـضا إلـى وجـود الجسيمات المضادة للكوارك والليبتون (متجهات القوى هـى فـى الوقـت نفـسه الجسيمات المضادة)

وكان دليل النجاح فى هذا البناء النظرى هو تزامن اكتشاف جـسيمات ذات صفات مختلفة أولا بأول مع تطور نظرية التوحيد والتماثل.

مفهوم التماثل يسيطر على الأمور بقوة، لأنه يحدد فـى آن واحـد اختيـار الجسيمات ونوعية التفاعلات التبادلية التى تؤديها. ومن ثم إذا عرفنا هذه التفاعلات فيمكننا التعرف على المتبقى منها، مما يسمح بالتعرف بجدارة على هذه الجسيمات مثلا، التماثل بين الإلكترون والنيوترينو، والكـوارك d و u يقودنـا إلـى التنبـؤ بالبوزون W ولكننا ندرك فى الحال أنه فى الوقت نفسه لابد أن نضيف الـــ Z أو للفوتون أو الاثنين وهكذا نتمكن من حساب تفاعلاتهما التبادلية.

أما الجلوون "gluon"[٧] والقوة القوية فهما محصلة التماثل بـين "الألـوان الثلاثة" الواصفة لجسيمات الكوارك.

هذا التماثل يعبر عن الدوران فى فضاء داخلى وسوف نـشرح فيمـا بعـد المفهوم بداخل إطار مكعب Rubik، ويـستطيع المكعـب أن يقـوم "بمجموعـة دورانات".

---

(٧) تاريخيا جاء من كلمة لاصق (glue) يعنى الذى يلصق أى اثنين من الكوارك فى بعض.

هذه الدورانات من الممكن اعتبارها تحولات خارجية وداخلية تعيد تـشكيل الألوان لواجهة 54 = 6 × 9 يمكن أن تتخيل إذا أن الإلكترون - أو الكـوارك - هو شكل المكعب وأن التماثل في النظرية عبارة عن تحولات داخليـة تغيـر فـى شكل/هيئة المكعب. وأما فى كل نقطة فى الزمكان[٨]، يمكن أن يتواجد أى جـسيم، إذن يجب أن نتخيل أن فى أى نقطة فى الزمكان يمكن أن يتواجد شـبيه المكعـب أو الفضاء الداخلى لأنماط الجسيمات. وربما نفرض أن النظرية يجـب أن تـصبح متماثلة بالنسبة لتطبيق تحولات المكعب المختلفة، كل تحول مستقل عن الآخر.

إذًا لابد أن تقدم آلية تمتص بطريقة ما تغير الفضاء الداخلى عندما نتحـرك من نقطة إلى نقطة مجاورة، هذه الآلية هى بدقة متجهات القـوى عـن تفاصـيل الانتشار والبث والامتصاص لمتجهات الجسيمات فنستطيع أن نتنبأ بهـا بطريقـة فريدة جدا ويمكن أن نتصور أن هذا يتطلب منا بناء رياضى غايـة فـى التعقيـد والثراء فى الوقت نفسه ولكن للأسف خارج نطاق محاضراتنا.

اللبنة الأخيرة فى هذه النظرية هو مفهوم الانكـسار التلقـائى للتماثـل؛ لأن بعض هذه الحالات متماثلة بدقة (مثل التماثل بين الألوان) وفـى حالـة الكـوارك الأخرى ليست إلا قريبة من التماثل (كالإلكترون والنيوترينو كل له كتلة مختلفة).

فى حالة الانكسار التلقائى للتماثل، نبدأ بنظرية ومعـادلات متماثلـة ولكـن حلولها الرياضية المستقرة ليست بالضرورة متماثلة كل على حدة إنما التماثل ينقلنا من حل إلى آخر.

هذا مثال كلاسيكى مشابه لبلية بقاع زجاجة: توازنها متماثل بالنسبة للدوران المحورى بينما الموقع الذى تختاره البلية ليس متماثلاً. وهناك عدد لا نهائى لمواقع التوازن المحتملة، التماثل بالدوران المحورى ينقلنا من موقع إلى آخر.

---

(٨) فضاء الزمان - مكان.

مفهوم انكسار التماثل يمكننا إذاً من فهم حالة الليبتـون[٩] المـشحون الـذى تختلف كتلته عن كتلة الجسيمات المضادة التى تصحبه " النيوترينو" أو أن الفوتون ليس له كتلة بينما كل من البوزون WوZ كتلتهما ثقيلة.

مجموعة الأفكار المطروحة هنا باختصار مكنت كلا من جيرهارد تهوفـت (Gerhard t' Hooft) ومارتينوس فيلتمان (Martinus Veltman) مـن الحـصول على جائزة نوبل سنة ١٩٩٩، وقد بدءا العمل بالنظرية منذ ١٩٧٥.

من خلال هذا العمل، حصلنا على ما نلقبه بالنموذج المعيارى وهـو الوصـول الفعلى إلى مبدأ توحيد القوى الذى بدأه ماكسويل (Maxwell) فى القرن الماضى بـين الكهربية والمغناطيسية (الكهرومغناطيسية) التى تصف التفاعلات التبادليـة الـضعيفة (تتحدث عن القوى الضعيفة حتى نضم الفوتون مع البوزونين Z و W).[١٠]

هذا النموذج يتنبأ بوجود بوزون لم يتم اكتشافه حتـى الآن اسـمه بـوزون هيجز (Higgs).

هذا البوزون يعطى كتلته لكل الجسيمات عن طريق مبدأ انكـسار التماثـل. ولهذا تم تكثيف البحث عن هذا البوزون عن طريق بناء معجل الـــLHC الجديـد فى CERN لاكتشافه.

مع أن نظرية النموذج المعيارى تصف كمًا ونوعًا كل الجسيمات التى تمت مشاهدتها (كيف تتم الأحداث) لكنها أغفلت الإجابة عن أسئلة كثيـرة (لمـاذا تـتم الأحداث هكذا ؟).

مثلا، لماذا هناك ثلاثة أجيال فقط من الجسيمات (الأعمدة الرأسـية بالرسـم «١»)؟

ولماذا تقتصر القوى الضعيفة فقط على أربعة متجهات قـوى (و لمـاذا لا نضيف أكثر)؟

---

(٩) الليبتون عائلة من الجسيمات ذات صفات معينة ومنها الالكترون والبوزيترون.

(١٠)تابع المحاضرة رقم ٢١٢ ضمن سلسلة محاضرات جامعة كل المعارف لدانيل تريل صفحة ٤٧.

كما أن كل كتل التقارن بالنظرية هى مقادير متغيرة القيمة وحرة (بـــارميتر حر). هناك على سبيل الحصر عشرون وهذا عدد ليس بالقليل، يا حبذا لو استطعنا أن نضع مبادئ تجمع هذه المعطيات المتفرقة.

وهل نستطيع أن نوحد أكثر القوى: أن نجد مثلا تماثلاً يصل بين جـــسيمات الليبتون وجسيمات الكوارك؟ ونضيف أكثر فى حالة وجود طاقات أعلى من التـــى توجد الآن فى المعجلات، هذا النموذج لا يصلح للعمل. إذن هو غير مكتمل حتـــى بالنسبة للظواهر الذى بنى من أجلها.

لقد ترك النموذج المعيارى حالة الجاذبية ولم يشرحها وحتـــى نـــصل إلـــى الرضا الكامل لابد لنا أن نضع بعض الاعتبارات تمكننا من الوصول إلى نجاحات نقوم بشرحها فى الباب القادم.

ماذا بعد النموذج المعيارى
نظرية المجال الموحد الكبرى، والتماثل الفائق والأوتار الفائقة

لقد تم ضم الجاذبية التى قدمها لنا نيوتن فى نظرية النـــسبية العامـــة التـــى وضعها آينشتين. النسبية العامة ذات رونق خلاب، لقد استطاعت بجـــدارة التنبـــؤ بعدد من الظواهر الفلكية. ولكن منذ ولادة ميكانيكا الكم ونحن نعلم بعـــدم توافـــق كليهما مع الأخر. يظهر هذا التنافر عندما نحاول أن نقربهما فى نظريـــة المجـــال الكًمى فنضع الجرافيتون كمتجه لقوى الجاذبية، عندئذ نحصل على الرسم الهندسى لفاينمان Feynman (كالشكل «٣-ج») ونضع بدلا من جسيمات الفوتون جسيمات الجرافيتون. عندئذ نحصل على نتيجة لا نهائية؛ لأننا عنـــدما نجمـــع طاقـــة كـــل الحالات الوسطية المحتملة للإلكترون - بوزيترون، فإن الحـــالات ذات الطاقـــات الكبرى تشارك بقيم ضخمة ومن ثم يصبح من المستحيل أن نضع مفهومًا للجاذبيـــة الكمية. إذا نظرية النسبية العامة صالحة بجدارة للطاقات الصغرى.

أصبح الهدف الحصول على نظرية متماسكة تستطيع أن تضاهى النسبية العامة عند طاقات صغرى. وفى بداية ١٩٧١ ظهرت مجموعة حلول مقبولة وغير مسبوقة من خلال نظرية الأوتار.

فى هذه النظرية، نعمم مفهوم الجسيمات الدقيقة والأولية إلى وتر دقيق جدًا كالكاوتشوك ينتشر فى الفضاء متذبذبًا. هذا المفهوم تم استخدامه فى أواخر السيتينات لشرح بعض خواص التصادم لجسيمات البروتون مع الجسيمات الأخرى عند التفاعلات التبادلية القوية. وهنا تختزل المسألة إلى مسألة ميكانيكيا كلاسيكية جميلة كان يستطيع آينشتين نفسه أن يحلها ببساطة منذ ١٩٠٥ لو ظن أنها تحل!

تنتشر الجسيمات الدقيقة فى خط مستقيم بسرعة ثابتة بطريقة تقلل طول المنحنى الزمكانى الذى يصف مسارها. تعريف الانتشار ونمط الاهتزاز يرجحان تقليل سطح الزمكان الذى يصفهما (بالضبط مثل فقاعة الصابون ومبدأ توتر السطح[١١]). هذا يمكن حسابه بالضبط بالنظرية. تم استخدام اسم الوتر بسبب تشابه أنماط التذبذب به مع أنماط تذبذب أوتار البيانو. يمكن أن تصف الذبذبات على نهج الذبذبات الموجودة بالميكانيكا الكلاسيكية، عندئذ يعطينا كل نمط ذبذبة مجموعة من الجسيمات، نستطيع بالضبط أن نحسب كتلتها. وهنا تبدأ المفاجآت ! نكتشف أن التكمية[١٢] مستحيلة للزمكان ذى الأبعاد الرباعية وممكنة لزمكان بأبعاد ٢٦ أو ١٠! هذا ليس عيبًا خفيًا: فالمسافات أيضًا (غير مرئية؟) الملحقة بها من الممكن أن تكون قصيرة جدًا ومن ثم تمر علينا غير مشهودة ولكننا نكتشف بالتوازى أن الجسيمات الخفيفة ذات كتل صفرية منها جسيمات عند طاقات منخفضة لها نفس صفات جسيم الجرافيتون. وفى خلال التصادم، نعطى الفرصة للأوتار بالتقطع أو لاثنين بإعادة تنظيم وصلاتهما، فنحصل على نظرية نستطيع فيها أن نحسب رسومات شبيهة بالرسوم الهندسية لفاينمان لحساب التفاعلات كما فى الرسم (٣) ولكن الخطوط بها تصف التذبذب لأوتار حرة. مما يعطى المثال الأول والمتفرد

---

(١١)تحاول الفقاعة أن تأخذ أقل سطح ممكن لتعادل التوتر السطحي مع ضغط الهواء الجوى.

(١٢)وجود الكمية على شكل مضاعفات لكم معين.

لأول نظرية متماسكة ومتقاربة رياضيا تضم الجاذبية. أنماط الإثارة للوتر تعطى طيفًا ثريًا بالجسيمات معظمها ثقيل جدًا. ومن المنظور التوحد مع الجاذبية غالبية هذه الجسيمات غير مرئى للأبد، لأننا إذا أردنا أن نولدها فى معجل ومع ضعف إمكانياتنا التكنولوجية الحالية فحتما سيكون هذا المعجل بحجم المجرة. نستطيع فقط أن نرى الجسيمات ذات الكتل الصفرية والجسيمات المقترنة بها. ونلاحظ هاهنا انقلابًا غريبًا لتعريف "الأولية " للجسيمات الأولية، لأنها تصبح ممثلة لانهائيًا على كل نقاط الوتر، الذى يصبح هو نفسه "أولى ". وأدى بنا التحقيق فى قضية ديناميكية الأوتار فى بداية السبعينيات إلى تقديم نظرية التماثل الفائق. هذا التماثل يصل بين جسيمات الكوارك- الليبتون (تعد إحصائيًا من الفرميون) كما فى الرسم (١) عن طريق متجهات القوى. وفى الحقيقة فإن الوتر الأكثر بساطة ليس فى طيفه أى فرميون. لقد حصلنا على جسيمات الفرميونات عند وضع درجات حرية إضافية تشابه عددًا لانهائيًا من العزم المغناطيسى الضعيف(١٣) بطول الوتر. وفرض هذا التوافق مع النسبية الخاصة تقديم تماثل بين أنماط التذبذب لهذه الدورانات وأنماط تذبذب مواقع الوتر. هذا التماثل له صفات جديدة جدًا فيوصف التماثل عند الدوران من خلال زوايا الدوران. ولهذه الزوايا قيم حقيقية عادية. وقدم هذا التماثل خصائص جديدة لعمليات الضرب مختلفة كثيرا عن الجبر العادى. فمثلا يصبح حاصل ضرب $a \times b = b \times a$ - بحيث $b \times a$ مختلفا عن العملية المعاكسة $a \times b$ للعملية a و b العددين

وأدت هذه الخصائص الجديدة وآثارها غير المتوقعة فى توحيد القوى والجسيمات إلى تسمية هذا التماثل بالتماثل الفائق وبالتالى الأوتار بالأوتار الفائقة. يصبح طبيعيًا فيما بعد تقديم هذه الأعداد عند حديثنا عن الفرميونات: تحقق جسيمات الفرميون (الإلكترون واحد منها) مبدأ باولى Pauli's للاستبعاد(١٤)، الذى ينص على أن احتمال وجود اثنين من الإلكترونات فى نفس مستوى الطاقة منعدم.

---

(١٣) الدوران المغزلى Spi.

(١٤) Pauli's exclusion principle.

أو بصيغة أخرى، احتمال حدوث الأحداث المركبة باستقلال هو حاصل ضرب احتمال كل حدث. مثلاً احتمال سحب قطعة دمينو واحد - واحد من أصل قطعتين هو ١/٣٦ وهو مربع ١/٦ فإذا كانت الاحتمالات (أو بدقة أكثر سعة الاحتمال) هى أرقام ضد تبادلية، ففى الحال مربعهما صفر وتم استيفاؤه مبدأ باولى بطريقة تافهة. حفزت الخواص غير الاعتيادية لنظريات مجال التماثل الفائق والأوتار الفائقة علماء الرياضيات على دراسة شاملة للبناء المؤدى إلى تلك الأعداد وهو مثال على كيفية خروج الرياضة البحتة عن الواقع.

وتتبقى مشاكل عديدة، لنر بعضها

الأبعاد الستة الزائدة، شكلها ومداها: ما عدد الدرجات الاختيارية بداخلها؟ (للآن تعطى الانطباع بأنها كثيرة) هل من الممكن التوصل إلى تكنيك ديناميكى لدراسة هذا السؤال؟ وهل هذه الأبعاد الزائدة لها عواقب ممكن مشاهدتها عمليًا؟

نظرية الأوتار المحدودة عند طاقة صغيرة لا تحتوى إلا على جسيمات ذات كتل منعدمة ولا نعلم كيف نقدم جسيمات ذات كتل أكبر كما فى الرسم ١(أو نشرح انكسار التماثل الذى يولدها) بدون تدمير معظم جمال الخواص المتماسكة الداخلية للنظرية. أهم مميزات نظرية الأوتار الفائقة هى ضم كل الجسيمات ذات الكتل المنعدمة تحت مظلة التماثل الفائق إلى واحد أو العديد من التماثلات مرتبطة فيما بينها بتماثل فائق. مما يعنى أن لا بد من وجود متجه قوة يحول الكوارك إلى ليبتون ومن ثم يمكن للبروتون أن يتحلل إلى ليبتون (بوزيترون ونيوترون مثلاً)، كما يسمح تماثل القوة التفاعلية الضعيفة بوجود البوزن وتحلل النيوترون. ويمكننا أن نقول إن البروتون يستقر بطريقة زائدة عمليًا ولا نعلم عن مدى عمره إلا حدًا أدنى قيمته كبيرة جدًا. إذن انكسار التماثل فى حالة الكوارك - ليبتون لا بد أن يكون كبيرا، أكبر من التماثل للقوى التفاعلية الضعيفة ولا نعلم كليًا مصدر انكسار التماثل إن وجد.

هل لا بد لنا أن نضع أولاً الأوتار في إطار أوسع يسمح بدراستها ومن ثم تستطيع الإجابة عن هذه الأسئلة؟ لا أحد يعلم.

كل الأسئلة المشغفة والممكن حلها فى إطارنا الحالى لم يتم حلها. ولكن الأوتار تحمل فى طياتها الإجابة على سؤالنا عن طبيعية النقطة المتفردة (Singularity) الموجودة فى مركز الثقب الأسود، موضوع لا يشك أحد فى وجوده وبالأخص فى قلب العديد من المجرات. وبالمثل، ماهية النقطة المتفردة الأولية أثناء الانفجار العظيم Big Bang[١٥]، عندما كانت كثافة الطاقة فى الفضاء فى أقصى معدلاتها مما ولد تذبذبات كمية فى الفضاء. وفى غضون هذا لم يكن للزمان والفضاء التعريف نفسه المتعارف عليه لحقبة بسيطة (ديناميكية) فى أثنائها تحدث الظواهر الأخرى.

كل هذه الأسئلة تمثل رهانات عميقة على فهمنا النهائى للزمن والمكان حتى نبرر اهتمام المواهب العلمية التى تستثمر بداخلها. ولكن هؤلاء الفيزيائيين أصيبوا بإعاقة بسبب نقص المعلومات التجريبية (العملية) التى تقود البحث.

لم تعد آلية الحركة بين النظريات والتجارب (التى سبق ذكرها فى المقدمة) مجدية، فالنموذج المعيارى يشرح جيدًا الظواهر المشاهدة والتى يمكن مشاهدتها حتى تستطيع أن تقودنا التجارب فعليًا إلى المستقبل. وبجانب المفاجآت التى من الممكن حدوثها (مثلاً كاكتشاف التماثل الفائق عمليًا، ربما تأتى المفاجآت القاطعة من مجالات أخرى فى الفيزياء، أو من علماء الرياضيات ولن تكون المرة الأولى التى يحدث فيها ذلك. وأينما كان اتجاه التقدم، فالرهان قوى على أن نظرتنا للجسيمات الأولية سوف تتقلب (مرة أخرى).

---

(١٥) الإنفجار العظيم الذى نشأ بسببه الكون من ١٠^١٠ x ٢ سنة.

إلى أى حد يمكن إنتاج أنوية ذرية[١٦]

بقلم: هيوبار فلوكار
Hubert FLOCARD

ترجمة: د. هدى أبوشادى

منذ أكثر من مائة عام أصبحت نواة الذرة موضوعًا للبحث العلمى. وكان نتاج نجاح كشف وتشخيص البناء الداخلى للذرة الذى بدأه كل من: هنرى بيكيريل (Henri Becquerel) وبيير كورى ومارى كورى (Pierre et Marie Curie) وإرنست راذرفورد (Ernest Rutherford) إزاحة الأفق الميكروسكوبى الذى حدد نوعية الرؤية الإنسانية فى القرن التاسع عشر. تبين لنا فيما بعد أن النواة مكونة من جسيمات البروتون والنيوترون التى تتكون بدورها من جسيمات أولية... وهكذا نسرد القصة حتى نصل إلى جسيم الكوارك والإلكترون أى "الحالة الراهنة" من مكونات المادة الأكثر صغرًا. ولم تعد النواة فى هذه الأثناء موضوعًا معمليًا فقط فمنذ أكثر من خمسين عامًا أصبحت تطبيقاتها العسكرية والمدنية مؤثرة على الحياة السياسية والاقتصادية للعالم وتطورت تكنولوجيا الأسلحة والمولدات النووية وبطريقة أقل أكملت دراسة النواة وتحليلها ونظامها الفيزيائى تطورها بجانب الآلية المخصصة لدراستها.

وبناء على المعلومات المكتسبة، يتطلع علماء الفيزياء النووية الآن إلى الدراسة المنهجية لمجموعة الأنوية الذرية التى تواجدت، لأمد ضئيل جدًا فى وقت أو آخر فى بداية تاريخ الكون. وباستخدام طريقة محددة للتصنيف، أمكننا وصف موضوعات البحث تحت المجهرية بأبعاد مكانية ومقياس طاقة مناسب لديناميكيتها. وسمح لنا هذا بتنظيم العالم الفيزيائى لطبقات، وأشارت التجربة إلى أنه من الممكن

---

(١٦)نص المحاضرة رقم ٢١٠ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٨ يوليو ٢٠٠٠.

دراستها بطرق مستقلة جزئيا الواحدة عن الأخرى. وتحتل النواة الذرية إحدى هذه الطبقات. وحجم النواة الذرية ١٠,٠٠٠ مرة أصغر من الذرة التى تقع فى قلبها أى حوالى عدة وحدات فيرمى[١٧] fm or fermi التى تتحكم فى بنائـــه الإلكترونـــى. والطاقات التى يستخدمها الفيزيائيون لدراسة الأنوية لا بد أن تبدأ من قـــيم الطاقـــة التى تتحكم فى حركتها (كما هو الحال فى معظـــم الـــنظم الفيزيائيـــة) والوحـــدة المصاحبة لها هى مليون إلكترون فولت[١٨] (هـــذه الوحـــدة صـــغيرة ظاهريًـــا إذا قارنًاها بالتى تحكم التفاعلات الكيميائية، مثلا كاحتراق الهيدروكربون فى محـــرك العربة. قيمة هذا الاحتراق أكبر مليون مرة بالمقارنة بالطاقات التى تتواجـــد فـــى الظواهر البيولوجية بمقدار مليار. إذا لابد أن نتفـــنن فـــى ابتكـــار طـــرق قويـــة لاستكشاف هذه الفيزياء. يعتمد هذا على تعجيل الذرات المنتقاة جزئيًا أو كليًا مـــن معينها الإلكترونى (أى الأيونات الثقيلة) وذلـــك باســـتخدام المجـــالات الكهربيـــة والمغناطيسية الملائمة. والأجهزة التى تستخدم هذه الطرق أقل قوة مـــن الأجهـــزة اللازمة لدراسة جسيمات الكوارك (لابد من الوصول إلـــى قيمـــة مليـــار مليـــون إلكترون فولت لدراسة الكوارك) والذى يحتم بناؤها المكلف إنشاءها ليس فقط على المستوى القومى ولكن على مستوى القارة حتى تخدم المجتمعـــات العلميـــة لـــدول كثيرة. كل الأنوية يتم تصنيفها طبقـــا لعـــدد البروتونـــات التـــى تحتويهـــا (رقـــم صحيح[١٩]) والتى تحدد كاملاً الصفات الكيميائية المصاحبة لها. ومنذ نهاية القـــرن التاسع عشر ونحن نعرف جيدا أن هذا الرقم يحدد لنا مكان العنصر الكيميائى فـــى جدول مندلييف. والعناصر المتواجدة على سطح الأرض عـــددها فـــى حـــدود ٩٢ عنصرًا، وبعد اكتشاف النيوترون[٢٠] تبين لنا أن كل نواة (أو نيوكلايد) تمتلك عددًا كاملاً من النيوترونات، وتسمى الأنوية التى لها عـــدد البروتونـــات نفـــسه وعـــدد

---

(١٧) $1 fm = 10^{-15}$ m

(١٨) 1 MeV $= 1.6 \times 10^{-13}$ joules

(١٩) Z (proton/electron) charge number

(٢٠) N neutron number

مختلف من النيوترونات النظائر.[٢١] ويقترب عدد الأنوية الثابتة (التى لا تتغيـــر أو تتحلل بمرور الوقت) من ١٦٠ كما تم تحديده من قبل.

وهذا يعنى أن لكل نواة يوجد على الأقل من واحد إلى اثنين نظائر طبيعيـــة فى المتوسط (مع وجد بعض الاستثناءات. ودفعت نظرية الفيزياء النووية ونظريـــة الفيزياء الفلكية الحالية معا الفيزيائيين إلى الاعتقاد أن عدد الأنوية التى تواجدت فى وقت أو آخر فى كوننا أكبر بكثير، فى حدود ستة آلاف فى رسم بيـــانى مـــدرج، حيث على المحور الأفقى عدد البروتونات والمحور الرأسى عـــدد النيوترونـــات، تتواجد هذه الأنوية الستة آلاف على مساحة منتهية على شكل موزة تبدأ فى نقطـــة الأصل الهيدروچين.[٢٢] الخط المتوسط للموزة يتبع أولاً الخط المنــصف[٢٣] ثـــم يلتوى إلى الأسفل لينتهى باليورانيوم.[٢٤] الحالات الـــ ١٦٠ من الأنوية المـــستقرة تقع على قوس قريب من خط الوسط، ولهذا السبب يسمى وادى الاستقرار. ويسمى علماء الفيزياء الحدود الجانبية للموزة بخطوط الصرف (الـــسريان) ويمثـــل الحـــد الأدنى خط سريان النيوترون والأعلى خط سريان البروتون.

وبفضل مجهودات إيرين وفريـــدريك جوليـــو كـــورى (Irène et Frédéric Joliot Curie) العلمية، نستطيع تصنيع نويدات (بطريقـــة مؤقتـــة) خـــارج وادى الاستقرار. نعرف الآن أكثر من ألف منها. لماذا تمثل مجموعة الأنوية الموجـــودة بالكون بهذا الشكل فى مستوى N وZ ؟ ولماذا عدد الأنوية المستقرة أقل بكثير من عدد الأنوية الموجودة أو المستثارة؟

الإجابة تعتمد على طبيعة النواة الكمية أكثر من خصائص التفاعلات الثلاثة الأساسية التى تحكم ديناميكيتها. بترتيب الأهمية لأسئلتنا هى التفاعلات القوية ثـــم

---

(٢١) Isotopes

(٢٢) $Z=N=1$

(٢٣) $(N = Z)$

(٢٤) $Z = 92$، $N = 143$، 146

الكهرومغناطيسية والضعيفة. وسوف نقوم بدراسة أثرها بالترتيب على وجـود أو عدم وجود نواة. سنبدأ إذن بالتفاعلات القوية. النظرية الحالية لهذه التفاعلات القوية تسمى نظرية ديناميكا الكم اللونية[٢٥] وتستخدم هذه النظرية فـي مجـال فيزيـاء الجسيمات، ولكن وضعها الحالى لا يسمح لها بشرح خواص الأنوية. ابتكر علمـاء الفيزياء طريقة لمعالجة هذا الموقف عن طريق إعداد نظرية تعتمد علـى تحليـل الظواهر تضم الآثار المصاحبة لبناء النواة المعقد. وهذا هو نتاج تحليل الظـواهر الذى سأشرحه فيما بعد. ولأنه من الصعب تحويل المعادلات الكمية إلـى كلمـات، فلقد تبنيت طريقة لعرضها رغم أنها تجريد ساخر، ولكنها تشرح الجزء الفيزيـائى الذى يبررها مما يسمح لنا بفهم وجود وموقع الحدود الطبيعيـة لخطـوط سـريان البروتون والنيوترون. سوف يصبح نموذج النواة إذا عبارة عن "سيرك البراغيث". سيرك النواة يضم أقفاصًا لعدد من براغيث البروتون وآخر من براغيث النيوترون ولكى لا تهرب البراغيث (تسرى)، تضعها فى حلبة رياضية لها رقعتا لعب (واحدة لكل نوع) فى ثقب (السيرك) المحفور فى الأرض. وتعتبر النـواة مـستقرة أمـام التفاعلات القوية إذا تواجدت كل البراغيث فى المـستوى الأرضـى. وفـى أدوار اللعب تقوم البراغيث العليمة بارتقاء سلمين (كل سلم فى رقعة)، تمثل كـل عتبـة بالسلم حالة كمية وتتصرف بالتوافق مع أهم المبادئ العلمية التى أتى بهـا القـرن العشرين، ألا وهو مبدأ الاستبعاد لباولى. هذا المبدأ ينص على أن كل عتبة تحتوى على الأكثر اثنين من البراغيث، وخارج سطح الرقعة تتمركـز البراغيـث علـى العتبات المتتالية للسلم بحيث تحتل العتبة التالية كلما ملئ ما قبلها، طبعًا البراغيـث الأخيرة هى الأقرب للأرض.

لنبدأ بنواة مستقرة،[٢٦] ونحاول أن ننصب سيركًا أكثر أهمية (أى نواة أكثـر ثقلاً) نقوم بهذا عن طريق وضع بعض براغيـث النيـوترون فقـط، أو براغيـث

---

(٢٥) (QCD) quantum chromodynamics

(٢٦) N= No, Z = Zo

البروتون أو عدد كبيرًا من كليهما (التبادل وسطية محتملة هو الآخر) فـــى الحالـــة الأولى التى أشرحها أولاً نتحرك أفقيًا على الرسم فى مستوى البروتونات ثم علـــى المستوى الرأسى للنيوترونات وأخيرًا على الخط المنصف الأول. تحدد التفـــاعلات التبادلية القوية أن صفات السيرك الذى يضم البراغيث تعتمد على تكوين كل قفص مصحوبة بانخفاض مستوى البروتون ولا تتغير بعدها رقعـــة النيوترونـــات. ولأن التفاعلات التبادلية القوية متماثلة فى تبـــادل الأدوار للبروتونـــات والنيوترونـــات، فالعكس يحدث عند إضافة البروتونات.

إذا أضفنا مثلاً أربعة نيوترونات، يظل عدد العتبات المملوءة بالبروتونـــات كما هو، بينما اثنتان إضافيتان مُلئتا بالنيوترونات. وكأن البروتونات خسفت أكثـــر عند تضاؤل أملها فى الفرار، وبالتالى يتغير طول ســـلم النيوترونـــات، وتـــستعد النيوترونات الأخيرة للهروب.

ولنتصور أنها مع ذلك تحت مستوى الأرض. لقد صنعنا إذن نـــواة جديـــدة مستقرة[٢٧] ومع ذلك إذا مضينا فى إضافة النيوترونات تصل هذه الطريقة إلى حـــد لها. لا يتحرك السلم ولكن درجاته العليا تحتلها النيوترونات. سوف نصل إلى وقت يتسلق فيه آخر برغوث نيوترون فوق أخلائه ويصل إلى عتبة فوق الأرض.

سوف يترك فى الحال النواة التى لا تستطيع أن تتكاثر أكثر من ذلك: هكـــذا نصل إلى خط سريان النيوترون. فى الحقيقة، عندما يتزايـــد عـــدد النيوترونـــات، ينضغط السلم وتتقارب عتباته (بسبب معالجة ديناميكا الكم للأمـــور فـــى الأبعـــاد الثلاثة) ونستطيع إضافة عدد من النيوترونات لنواة بها عـــدد نيوترونـــات كبيـــر بطريقة أكثر من لو أن لها عددًا صغيرًا ويبتعد خط سريان النيوترون بانتظام عـــن الخط المنصف الأول تبعًا لخط يعتبر تقريبًا مستقيمًا يـــصنع معهـــا زاويـــة تُقَـــدر بحوالى سالب عشر درجات. وبطريقة متماثلة تصلح طريقة التفكيـــر نفـــسها فـــى

---

(٢٧) $N = No + 4, Z = Zo$

التنبؤ بخط سريان البروتون الذى يصنع مع الخط المنصف عشر درجات. فى المقابل عندما نضع فى آن واحد البروتونات والنيوترونات، فإن إضافة البروتونات تثقب الرقعة المخصصة بالنيوترون. فيخفض هذا أقدام السلم بحيث تقع براغيث النيوترون الجديدة أعلى سلمها وتبقى فوق سطح الأرض. إضافة إلى أن البروتونات لها الأثر نفسه بالمعنى العكسى. النواة الجديدة هى أيضًا نواة مستقرة مثل النواة الأصلية. يمكن تكرار هذا الأسلوب لانهائيا. ومن ثم إذا كان الكون يحكم فقط بالتفاعلات التبادلية القوية، فإن كل النويات التى تقع حول الخط المنصف فى زاوية مقدارها ± عشر درجات ستكون مستقرة وبالأخص سيتواجد عدد لانهائى من الأنوية. توضح التفاعلات الكهرومغناطيسية لنا أن هذا لا يحدث فى عالمنا. فالبروتونات التى لها شحنة موجبة تتنافر. مما يعنى أن السيناريو الموضوع يصبح صحيحًا فقط للبروتون. فإضافة البروتونات تقود إلى ارتفاع رقعة البروتونات كلما زاد عدد البروتونات (وهى نتيجة المرمى اللانهائى لقوة كولوم[٢٨]). وينخفض خط سريان البروتون فى مستوى الرسم للبروتون والنيوترون ولتفادى الهروب من أقفاص البروتون، لا بد دائمًا من إضافة عدد من نيوترونات زيادة عن عدد البروتونات. وهكذا ينحنى مقطع زاوية الاستقرار إلى الأسفل ويبتعد قليلاً قليلاً عن الخط المنصف ويمر بالكامل فى منتصف المستوى. وتؤدى للأسف هذه الزيادة فى النيوترونات إلى التقابل مع خط سريان النيوترون الذى لم يتحرك. عند قيم محددة للبروتونات، يصبح من المستحيل إضافة المزيد منها دون أن يتواجد بعضها فوق سطح الأرض وهروبه. وهكذا يختزل مقطع الزاوية اللانهائى الذى تنبأت به التفاعلات القوية إلى منطقة منتهية تحتوى على ٦٠٠٠ نويدة استُحِثَت لأعلى. ويأتى هنا دور التفاعلات الضعيفة التى تخفض عدد الأنوية المستقرة عن ٦٠٠٠. فعندما نتصور الأقفاص، يمكن أن نصف الحدث التفاعلى الضعيف على أنه نوع من التحول البيولوجى. وعندما تكون الشروط مناسبة فمن الممكن أن يتحول

(٢٨) Force Coulombienne

برغوث نيوترون إلى برغوث بروتون (فى الواقــع يمكــن أن يتحــول أى مــن جسيمات الكوارك الثلاثة للنيوترون إلى كوارك آخر مع انبعاث إلكترون ونيوترينو مضاد). وهكذا عندما يدرك أعلى برغوث نيوترون أن عتبته أعلــى مــن العتبــة الخالية للبروتون التى لها طاقة على الأقل تساوى نصف مليون إلكترون فولت[٢٩] عندئذ يتحول إلى بروتون ويغير رقعته ليستقر على سلم البروتونات. ويتكرر هــذا الحدث عندما تتجاوز فروق الطاقة بين العتبات الأخيرة المــشغولة للــسلم نــصف مليون إلكترون فولت. وهكذا نحصل على نواة مستقرة للأبد، فى ضريح الـــ ١٦٠ نواة التى تتواجد فى بيئتنا الحالية. فالوقت النموذجى لهذه التحولات (هو ما نــسميه الإشعاع الذرى[٣٠] بيتا يتدرج بين بضع دقائق و $١٠^{-٤}$ ثانية).

لماذا إذن يقول علماء الفيزياء إن هناك ٦٠٠٠ نواة إذا كان معظمها يتحلــل ذاتيًا؟ هذا سؤال إجابته تكمن فى مفهوم تدرج الزمن. لنتأمل الإنسان. إنــه غيــر مستقر لأنه فان. والوحدة المناسبة لوصف أحداث حياته هى مثلا الثانية، فإذا كــان عمره مائة عام، يكون قد عاش $٣×١٠^{٩}$ ثانية. لنتأمل الآن نــواة تكــون وحــدتها المميزة للطاقة مليون إلكترون فولت. عند هذه الطاقة، تعطينا علاقة مبدأ اللايقــين زمنًا نموذجيًا يساوى $١٠^{-٢٢}$ ثانية. هذا الزمن المتصل بنشاط النواة يماثل الثانيــة بالنسبة للإنسان إنه يمثل زمن هروب أحد البراغيث لنواة مــصنعة مــن الجهــة الخاطئة لخط السريان. فالنواة التى أصبحت غير مستقرة عن طريــق التفــاعلات الضعيفة والتى تتحلل فى خلال $١٠^{-٤}$ ثانية تكون عندئذ قد عاشت $١٠^{١٨}$ ثانية مــن الوحدات الزمنية الأولية لحياتها. يماثل العدد $١٠^{١٨}$ بالنسبة للإنسان عمــرا أطــول من حياة الكون. وكما سيعتبر هذا الإنسان خالدًا سوف يعتبر عالم الفيزياء النوويــة الذى يقيس عمر الأنوية على مقياس الزمن أن هذه الأنوية بالفعل خالدة.

---

(٢٩) ($mc^2=0.5$ MeV) وزن الإلكترون $\equiv m$

(٣٠) $\beta \equiv$ beta radiation

والآن وبعد أن أجبت عن السؤال الموجود بعنوان هذا الفصل عـــن طريـــق توضيح إمكانية إنتاج الأنوية الذرية من الواجـــب شـــرح الأســـباب التـــى تـــدفع الفيزيائيين إلى إنتاجها ودراستها. إنها عديدة. إنها تتصل بإرادة العلماء فى تعميـــق الآلية الديناميكية النووية، بسبب الرغبة فى التمكن من فهم قواعد الطاقة لمجموعة كبيرة من التركيبات النجمية والبحث عن تطبيقاتها الممكنـــة. فـــالبعض يخـــتص بالقضاء على المخلفات النووية عن طريق التحويل الكيميائى، والآخر فـــى الطـــب باستخدام الإشعاعات الموجهة للخلايا (السرطانية) وللتصوير والدراسة الحية للمادة الحيوية. ويعتبر تواجد سلسلة معينة من النظائر المشعة شيئا له أهمية كبرى فـــى تحليل ظواهر الفيزياء للمادة المكثفة.

هذا الملف القصير لا يستطيع أن يعطينا بانوراما مكثفة لمجـــالات الفيزيـــاء النووية الأساسية التى تحفز العلماء على اقتراح بناء آلات بدورها تسمح باكتـــشاف كامل للعالم النووى الذى ليس له حدود بالداخل. سوف أركز الآن علـــى دراســـة ثلاثة أشياء، الأنوية الهالية، والتخليق النووى بالنجوم، والأنوية الفائقة الثقل. عنـــد قيمة ثابتة للبروتون، يزيد عدد النيوترونات حتى يلمس خط سريان النيوترون، فى بعض الأحيان ندرك أن حجم النواة يكبر فجأة. مثلاً نويدة نظير الليثيـــوم الحـــادى عشر[٣١] تحتوى على ٨ نيوترونات و٣ بروتونات. وهى نظير أحد العناصر الأقل وزنا، ولكن حجمه يقترب من حجم الأنوية المـــستقرة التـــى تحتـــوى علـــى٢٠٠ نيوترون وبروتون. وبالمقارنة نظير الليثيـــوم التاســـع[٣٢] ^{9}Li، لـــيس بـــه إلا ٦ نيوترونات وله حجم أصغر عشر مرات من نظيره الثقيل. بينما لا يتواجد النظيـــر العاشر. نتصور أن النظام ذا النيوترونات الثمانية مكون من قلبه ونظيـــر الليثيـــوم التاسع محاط بسحابة من النيوترونات ممتدة تحتوى على اثنين مـــن النيوترونـــات المتصل أحدهما بالآخر. تسمح لنا دراسة هذه المادة الغنية بالنيوترونـــات بتحديـــد

---

(٣١) Li^{11}

(٣٢) Li^{9}

الديناميكية النووية فى مجالات للآن صعبة المنال معمليًا. وبطـول خـط سـريان النيوترون، لابد وأن تتواجد نويدات سطحها غنى جدًا بالنيوترونات. سوف تعطينـا فى المعمل معلومات عن الحالة النووية التى تم اقتراحها لشرح سلوك البلـسار[٣٣] (النجم النابض)، نجوم فى الوقت نفسه وزنها ثقيل (وزنها يتراوح من ١٠ إلى ٣٠ مرة أكبر من شمسنا) وغاية فى الصغر (قطرها يتكـون مـن بـضع عـشرات الكيلومترات) وكذلك نظن أن الأنوية المستقرة تلعب دورًا هامـشيًا فـى التخليـق النووى بالكون، إنهم متفرجون أكثر منهم ممثلين. يتطلـب فهـم نـشاط النجـوم (التفاعلات النووية) معرفة دقيقة للأنوية البعيدة عن الاستقرار. سوف تكون مـثلاً الغنية جدًا بالبروتونـات[٣٤] التـى تـشترك فـى إحـداث التفجيـرات المؤديـة للسوبرنوفا[٣٥] أو الأنوية الغنية بالبروتونات التى تتكون فى أنظمة النجوم الثنائيـة التى تولد أحزمة الأشعة السينية وأشعة جاما المركزة. توضح النظرية أنـه عقـب الآثار الكمية[٣٦] الزائدة (فى صورة سيرك البراغيث يوافـق سـلمًا لـه عتبـات موضوعة بغير انتظام، ضيقة فى بعض الأماكن وواسعة فى أخرى) والأنظمة التى يوجد بها آخر البراغيث على عتبة بعيدة جدًا عن ما يليها لها اسـتقرار متزايـد. وطبقًا للنماذج النووية الحالية، فإن الأنوية الثقيلة جدًا الواقعة بعيـدًا عـن منطقـة الاستقرار، تتواجد فى حيز منعزل من المستوى نسميه جزيرة الفـائقى الثقـل[٣٧]. ونذكر أن من خصائصهم المثيرة أن كيمياء الذرات المصاحبة لها لا بد أن تعـدل بإدخال نظرية النسبية. فضلاً عن أنها أنوية لا يستطاع تكوينها بأى آلية فيزيائيـة معروفة حاليًا. تصنيع الأنوية الذرية المذكورة أعلاه يتطلب تركيبات معقدة تستخدم المعجلات لحزمة مركزة من الجسيمات خفيفة الـشحنة (بروتونـات فـى معظـم

---

(٣٣) Pulsar نجم نابض

(٣٤) N>Z

(٣٥) Supernova (النجوم فائقة الاستعار)

(٣٦) نسبة إلى الكم

(٣٧) Superlourd

المشاريع) تتصادم مع أهداف لعناصر أكثر ثقلاً (رصاص أو يورانيوم مثلاً) سيخلق معظم الأنوية الذرية النادرة. وسوف يعزز هذا بطرق كهرومغناطيسية ويرسل إلى منظومة معملية للتحليل. وإلى يومنا هذا، أقامت اليابان منشأة سوف تقوم بعملها فى منتصف هذا العقد. ومشروع مشابه لابد أن يبت فيه قريبا فى الولايات المتحدة. أما فى أوروبا، فآلات إعدادية سوف تعمل قريبًا فى معامل جانيل بكاين والمركز الأوربى للدراسات النووية بجينيف.[٣٨] وسوف يُفتتح مشروع لمنشأة أوروبية لها طموحات مماثلة للمشروعات الأمريكية واليابانية فى الأعوام القادمة.

وجود هذه الآلات فى متناول يدنا سوف يفتح الأبواب للفيزيائيين على عالم نووى قد بدأ يتراءى لهم آفاقه. وهكذا يمكن للعلماء مد نطاق معلوماتهم بدءًا من الأنوية المستقرة إلى مجموعة الأنوية الموجودة (مع الاحتفاظ بكل الاحتمالات). ويمكننا أن نقارن هذا بسلوك عالم أهمل دراسة الآثار الإنسانية حتى يستطيع دراسة العلوم الإنسانية.

(٣٨) CERN

حياة الجزيئات البيولوجية فى الزمن الحقيقى: الليزر وديناميكية البروتينات[٣٩]

بقلم: جون-لويس مارتين

Jean-louis MARTIN

ترجمة: د. هدى أبو شادى

نصدق الأبحاث التى تدور حول الخريطة الوراثية بينما كتالوج الاحتمالات الجينية والبروتينية فى طريقه للانتهاء. لقد وصلنا إلى الحقبة الفعالة التى ستقودنا إلى فهم كل الجزيئات المجدولة المتداخلة التى تصنع الحياة.

يعتمد المكسب الذى نحصل عليه من هذا الكم من المعلومات على قدرتنا على دمج هذه المعطيات الجزيئية فى رسم تخطيطى يشرح تكوين نشاط الخلية، وأيضًا الأعضاء والكائنات العضوية.

يعتمد هذا الدمج على تنوع مجالات البحث المختلفة عن المجالات التقليدية التى أدت بدورها إلى تقدم بيولوجيا (علوم الحياة) الأنظمة المتكاملة. على مستوى الخلية، يصبح التصور العلمى متقدمًا جدًا لأنه يرتكز جزئيًا على التنافس وأيضا على التكنولوجيا والمبادئ المشتركة مع علم الوراثة والبيولوجيا الجزيئية. ومع ذلك فإنها للآن غير قادرة على الوصول إلى تلاحم مع الأدوار الفعالة لعدة عوامل حددت لها أدوارها بقلب الخلية: كالمستقبلاتّ Recepteurs، والقنوات الأيونية Canaux Ioniques، المراسيل Messagers والمراسيل الثانوية Second messagers. يصبح التقدم فى هذا المجال لصيق الارتباط بقدرتنا على تطوير آلية تسمح لنا بمتابعة هذه العوامل فى وضع ثابت وبمعاملة يسيرة على مستوى الجزىء.

(٣٩)نص المحاضرة رقم ٢١١ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٩ يوليو ٢٠٠٠.

سمحت التطورات التكنولوجية المشهودة فى مجال الليزر النبضى بتطــوير ميكروسكوب جديد ثلاثى – الأبعاد: الميكروسكوب المتحد البؤرة – متحد البــؤرة اللاخطى. وبفضل استخدام صفات بناء البروتين الفلورى البراق فلقد ســمح هــذا الميكروسكوب بتطوير ملموس فى حصر مكان أى هدف بروتينى أو التعرف على طرق الحركة ضمن الخلوية (بداخل الخلية). وفى غضون هذا، يمثل فــك شــفرة الدور الفعال لمختلف العناصر خصوصًا البروتينية (فى موقعها وحياتها)، أو أكثر فهم الآليات الداخلية، تحد لم يستطع غير عدد قليل من فرق البحث العلمى العالمية أن يقوم به. يرتبط هذا بإيجاد الآليات التى تسمح (بإعطاء معنى) بتفسير شلال من الأحداث التى تمتد على مقياس زمنى يتراوح بين بضع مئات من الفيمتو(٤٠) ثانيــة إلى عدة آلاف من الثوانى.

عمل البروتينات فى الزمن الحقيقى

أداء الجزيئات العينية البيولوجية – البروتينات، الأحماض النوويــة يــرتبط بقدرتها على تعديل أبعاد أشكالها عند تفاعلها مع كائنات محددة فى البيئة. يتطلــب المرور من شكل إلى آخر تغيرات ضئيلة فى الطاقة مما يسمح بحــساسية كبيــرة تُغير بارمتيرات البيئة، ويرتبط هذا بالديناميكا الداخلية للجزيئات العينية البيولوجية التى تظهر فى مجال زمنى واسع. كتقريب أولــى، نــستطيع اعتبــار أن ســرعة التفاعلات البيولوجية هى حاصل ضرب حدين، الديناميكا الذاتية للذرات واحتمــال الانتقال الكهربى. وفى الأغلب يحدد هذا العامل الأخير الخاص بالاحتمال ســرعة التفاعل. التفاعل البيوكيميائى غالبًا بطىء وهو ليس كعاقبة للأحداث الذاتية البطيئة ولكن كنتيجة للاحتمال الضعيف لإنتاج بعض من هذه الأحداث الجزئيــة. وبدقــة أكثر، فالتفاعل البيولوجى الذى يضمن تمزق أو تكوين وصلة ربط ملزم بنــوعين من الأحداث: من جهة انتقال نسبى لأنوية الذرات، ومن جهة أخرى إعادة توزيــع

---

(٤٠) الفيمتو ثانية هو واحد على مليار مليون من الثانية

الإلكترونات على عدة مدارات. يمتد هذان النوعان من الأحداث على مقياس زمني خاص بكل منهما يعتمد على البناء الإلكتروني والأوزان الذرية للعناصر المكونة للجزيء. وهكذا فإن ديناميكا (حركة) الذرة حول مواضع التوازن هي كتقريب أولي مثل حركة بندول توافقي مكون من أوزان دقيقة متصلة لها قوة استرجاع. في حالة الجزيئات العينية البيولوجية، تتطور آلاف الذرات التي يضمها النظام على سطح فوقي من الطاقة تتحدد أبعاده بعدد درجات حرية مجموعة المركب. فالعمل الذي يؤديه البروتين وله طبيعة متغيرة يحفز في حالة الإنزيمات، يوصل للإشارة في حالة المستقبلات، يحول الشحنات من موقع إلى موقع وينقل المواد... ولكن توجد خاصية مشتركة في عمل كل هذه البروتينات، هي اختيار الطرق الكيميائية التفاعلية المحددة في قلب هذا السطح الجهدي. بالتأكيد البيولوجي يستكشف الفضاء التوافقي، وإلا كانت تكلفة الأنتروبي Entropie فادحة على التفاعل وعلى الكائن العضوي الذي يستضيفها. معرفة طرق التفاعل في قلب هذا البناء، هي الهدف الرئيسي لتجارب الفيمتو - بيولوجي.

الطريقة التجريبية: إنتاج رجفة زلزالية جزيئية ومتابعتها عن طريق ستروبوسكوب[٤١] الليزر للفيمتو ثانية

بداخل البروتين، الذي يحتوي على آلاف الذرات، الجزيئية ليس شيئًا هيّنًا تحديد الحركات المشاركة في التفاعلات. كيف ننجح في تعريف الديناميكية التي بدورها تؤدي إلى تشكيل وسيط للبنية يكون وقتيًا وقليل الاحتمال. الطاقة الحركية لهذه التحركات تتحدد مباشرة بأنماط تذبذب البروتيانات. ونتوقع أن تقع الحركة في مجال الفيمتوثانية أو البيكوثانية. نأمل أن نعرف بعض النجاح في هذا البحث، فمن الضروري أن نستخدم نظامًا جزيئيًا نستطيع أن نتناوله معمليًا ونمثله كنموذج رياضي بالحاسوب، فالإمضاء الطيفي لديناميكا البروتينات يعطي معلومات غير

(٤١) Stroboscope منظار دوامي رعاش يرى به الجسم الدائر بنفس سرعته وكأنه ساكن.

مباشرة وزيادة على ذلك، فالتفاعل الذى ندرسه لابد أن يستحث بطريقة متزامنة Synchrone لمجموعة الجزيئات. ومن الضرورى أن نصيب مجموعة جزيئات بالاضطراب بطريقة فسيولوجية[٤٢] على مقياس زمنى أقصر من حركاتها الداخلية الأكثر سرعة. أى هذا التناول "الضارب"[٤٣] مشترك فى معظم مجالات البحث التى تستخدم نبضات الفيمتوثانية. البيولوجيا لا تستنتج كل شىء عند هذه النقطة إلا عن طريق توفيق اضطراب ضوئى لحث آخر فسيولوجى. تحل هذه المشكلة طبيعيًا فى حالة المستقبلات الضوئية[٤٤] حيث إن الفوتون الضوئى هو المدخل الطبيعى للنظام. هذا يشرح الأعمال العديدة على التمثيل الضوئى كانتقال الإلكترونات فى مراكز التفاعل البكتيرى وانتقال الطاقة فى قلب الهوائيات الجامعة للضوء فى البكتريا، وكذلك انتقال الشحنات بداخل إنزيمات الإصلاح للدى إن إيه[٤٥] NDA، أو المسئولة عن تزامن الإيقاع البيولوجى مع أشعة الشمس، وكذلك الأبحاث على الخطوات الأولى للإبصار فى الرودوبسين[٤٦]. وتوجد حالات منفصلة حيث يحمل البروتين إنزيمًا مساعدًا نشطًا ضوئيًا، بدوره يساعد على قدح التفاعل الداخلى. هذا حال الهيموبرتينات كالهيموجلوبين الذى نجده فى الخلايا الدموية الحمراء أو الأنزيمات الموجودة فى تنفس الخلايا كالسيتوكروم[٤٧] أوكسيداز (الخلايا الملونة المؤكسدة) فى هذه الهيموبروتينات، من الممكن أن نكسر(ربيطة)[٤٨] وصلة ربط (الأوكسجين، أوكسيد الكربون أو النيتروجين) فى مرساها عن طريق تعريضها

---

(٤٢) Physiologique فسيولوجى: علم الوظائف، فسيولوجيا ووظائفيًا للخلية أو الجزيئات.

(٤٣) Percussionelle يقصد بالضارب أنه يصيب النظام المرغوب دراسته بالاضطراب وهكذا يمكننا متابعته.

(٤٤) Photorecepteurs المستقبل الضوئى خلية حساسة للضوء.

(٤٥) DNA deoxyribonucleic acid.

(٤٦) Rhodopsine مادة ملونة ذات حساسية للضوء فى شبكة العين لبعض الأسماك البحرية ومعظم الفقريات العليا ولها أهمية فى الرؤية.

(٤٧) Cytochrome oxydase خضب خلوى.

(٤٨) الربيطة: ذرة أو مجموعة ذرات أو أيونات تحيط بالذرة المركزية.

لنبضة ضوئية فمتوثانية. ونقترب هنا من الشروط الفسيولوجية، فالانتقال الـضوئى يسمح بنقل الموقع النشط للهيموبروتين فى حالة غير مستقرة، ممـا يـؤدى إلـى انقطاع موضع وصل الربيطة النشطة فى أقل من خمسين فيمتوثانية. تـؤدى هـذه الطريقة إلى الوصول إلى تزامن مجموعة من التفاعلات لعدد كبير من الجزيئـات وهكذا يمكن متابعتها خلال التفاعل وتحديد تغيرات تشكيل البنية الكيميائيـة عنـد وصول ممرات الطاقة. نستطيع أن نصل إلى تشبيه مماثل فى مجال الرياضة: عند مراقبة تطور سرعة جموع قائدى الدراجات فى جولة من جولات كـأس فرنـسا تستطيع تعقب مقطع الممرات والجولات ولكن بشرط أن ينطلق سائقو الـدراجات فى الوقت نفسه. والآن لفرقة من الجزيئات، فالليزر الفمتوثانى يلعب دور الطلقـة التى تبدأ الجولة.

المنظر الطبيعى للجزيئات فى اللحظات الأولى للتفاعل: انتشار الزلزلة الجزيئية

فى اللحظات الأولى التى تلحق الاضطراب (الاهتزاز) (انفـصال أكـسجين الهيم مثلاً) سوف تبقى الأحداث الجزيئية الأولى متمركزة فى البيئة القريبـة مـن الموقع النشط. عند أقل تغير زمنى فى مجال الفمتوثانية يحدث تغير مكانى فى قلب الخلية وهكذا يصبح من الممكن تتبع انتشار تغيرات البنيـة الـشكلية فـى قلـب الجزىء. وحتى نعطى تصورًا لحجمها فإنها تحدث (كتقريب أولى) بسرعة الموجة الصوتية أى حوالى ١٠^{-١٢}×١٢٠٠ متر فى الثانية وعندما تترجم لمقياس الجـزىء تصل إلى ١٢ أنجستروم / بيكو ثانية. فى خلال ١٠٠ فيمتو ثانية يقع الاضـطراب الأولى فى الموقع النشط. ونحن فى بداية الاهتزاز (الزلزلة) الجزيئـى. وعنـدما نزيده باضطراد تتأخر النبضة التحليلية عن النبضة الانفصالية وهكذا نـستطيع أن نرى طرق التغيرات فى البنية الشكلية للبروتينات وتحديد الحركات المصاحبة لعمل الجزىء الفوقى.

يوضح هذا الحساب البسيط أن الدراسات الطيفية الفمتوثانية تتباين بطريقـة أساسية عن طرق الحل الزمنية الضعيفة، فلم يعد يهمنا أن نحـسب بدقـة أفـضل

ثوابت التفاعلات ولكن اهتمامنا الأكبر بأهمية الفمتوثانية ينبع من أننا للمرة الأولى نستطيع أن نحلل الأحداث فى منشأ هذه التفاعلات وتلك الأحداث التى سببتها التفاعلات.

هذه التغيرات المكانية المصاحبة لحل الفمتوثانية لها هدف آخر، ألا وهو تبسيط الأنظمة المركبة بدون اللجوء إلى طرق اختزالية مثل تقطيعها كيميائيًا. تتسبب هذه الطرق الاختزالية فى أن يدرس عالم البيوفيزياء الجزيئية مجموعة جزئية من الجزىء المركب لا تشترك فى خواصها كثيرًا مع الأداء البيولوجى للمجموعة الكاملة.

فهم ذاتية التشغيل الجزيئية

منذ بداية الثمانينات، تم تطوير الطريقة الضاربة فى نظام الفيمتوثانية فى مجال الديناميكا الفعالة للهيموبروتين وخاصة لدراسة الهيموجلوبين. هذا البروتين يحتوى على أربعة مواقع لتثبيت الأكسجين الهيم وهو قادر على الضبط الذاتى وهذا الضبط اسمه الألوستريكى. الضبط الألوستريكى للهيموجلوبين يترجم عندما نشرح أن انفصال أو اتصال جزىء الأكسجين يؤدى إلى تغير فى معامل ترابط الهيم الأخرى للأكسجين ٣٠٠ ضعف. بناء الهيموجلوبين معروف بدقة ذرية فى حالته المترابطة (أو أوكسيهيموجلوبين Oxyhemoglobine) أو حالته غير المترابطة (Deoxyhemoglobine). من هذه الأبحاث نعلم أن الهيموجلوبين يتميز باحتوانه على بنائين مستقرين وميل عال للتفاعل، أو ميل منخفض للتفاعل مع الأكسجين. يتطلب منا هذا أن نحدد الآلية التى حدثت بدءًا من انقطاع وصلة ربط كيميائية بسيطة بين الأكسجين والحديد الذى يحدث تغيرات فى البناء الشكلى لمجموعة التترامر[٤٩] الذى يؤدى بدوره إلى تعديلات مهمة فى قابلية المناطق الأخرى للوصلات على التفاعل الكيميائى.

---

(٤٩) Tetramere مبلمر رباعى الجزىء

المناظرة فى هذه الحقبة اهتمت بالانتقال الألوســتريكى Allosterique فــى الهيموجلوبين، ولم تكن قد حددت بعد الاختيار بين المسببات أو العواقب فى قلــب البنيان الجزيئى. بفضل أبحاث ماكس بيروتز Max Perrutz نحن نعرف البنــاءين فى حالة التوازن بدقة ذرية. لقد كان معلومًا لنا، وحتى وإن لم يقر به الجميــع، أن انفصال الأكسجين عن الهيم L'heme يؤدى إلى تغير فى البناء الشكلى للأخير عن طريق انتقال ذرة الحديد خارج سطح البيرول(٥٠) (وتواجد نموذجين متناقضين: هل هذا الانتقال سبب أو عاقبة لتغير البناء الــشكلى أى البنــاء الثلاثــى أو الربــاعى للهيموجلوبين؟ التصور الأول أن هذا الحدث مهم جدًا لأنه أجج اتصال الهيم – هيم فى قلب الهيموجلوبين، أى الطريقة التى تترجم الاضطراب الموضــعى (انقطــاع وصل ربط كيميائية إلى تأرجح البناء العام تجاه حالة أخرى) عند تغير الأحــداث الزمنية بعد انقطاع وصلة ربط وصيلة الحديد. وتم إثبات أن الحــدث الأول هــو انتقال الحديد خارج مستوى الهيم فى ٣٠٠ فيمتوثانية. هذا الحدث الفائق الــسرعة يمثل خطوة مهمة فى تفاعل الهيموجلوبين مع الأكسجين. فالهيم يشترك فى إعطاء الهيموجلوبين خصائص الناقل للأكسجين عن طريق السماح باتصال موقــع ثبــات الأكسجين بموقع آخر. حدث وقتى جدًا، وعلى المقياس النانوسكوبى له إذا أثر على مستوى النظم الفسيولوجية الكبرى ألا وهو ملء الأنسجة بالأكسجين. ويبقــى إلــى الآن السيناريو اللاحق لهذا الحدث الأولى المؤدى إلى اتصال الهيم – هــيم غيــر معروف، ولذلك فمن الضرورى إيجاد آليات تسمح بمتابعة انتشار هــذا الاهتــزاز الأولى فى قلب البنيان وتحديد الحركات الذرية المشاركة فى طرق التفاعل. آليــات جديدة تنتظر الاكتشاف بعضها فى طور التطور مثل الأشعة السينية –الفيمتوثانيــة والتحليل الطيفى للأشعة تحت الحمراء، من المحتمل أن يكونا الآليات الموائمة.

---

(٥٠) Pyrrole

العامل المساعد الإنزيمى:
تعريف حالات الانتقال

فى تعليقه على جائزة نوبل للفيمتوكيمياء، كتب رئيس تحرير مجلة Nature فى آخر بارجراف "إنه من غير المستبعد أن التغيرات فائقــة الــسرعة بالأنظمــة البيولوجية سوف تحظى باهتمام متزايد".

على أى أساس بنيت هذه الثقة؟

بُنيت جزئيا، على أفكار مضى عليها نصف قرن: أفكــار لينــوس بــاولينج Linus Pauling الذى كانت له طبيعة نظرية. اقترح باولينج أن دور الإنزيمات هو زيادة احتمال حدوث حالة تشكيل البنية عند طاقة عالية وقتية، أو بالأصح تثبيــت حالة الانتقال، أى حالة تشكيل البنية الذى يقود إلى التحفيــز أو بكلمــات أخــرى: يتطلب الأمر تحسين مظهر الفريق فى قمة السباق. الحال بالنسبة للإنزيمات كحال المتسابقين أنه فى هذا المكان يقع مستقبل التفاعل وهنا أيضا تتدخل الإنزيمات.

لابد أن يكون السابق لفهم عمل الإنزيمات هو تحديد حالات الانتقال. وكــان الإثبات المعملى غير المباشر هو إنتاج الأجسام المــضادة المــساعدة – أو إبــزيم (Abzymes) بفضل ليرنر (Lerner) وشركائه فى بداية الثمانينيــات مــن القــرن الماضى. وتواصلا مع أفكار باولينج، فإن الأجسام المضادة تعــرف هــدفها الــــ (epitopique) فى حالته الأولية (يعنى عند أقل جهد فى منحنى الطاقــة). وهكــذا تدرك الإنزيمات هدفها، الركيزة (Substrate)،[٥١] عند انتقاله إلى أدنى نقطة فـــى منحنى الطاقة. سوف تصبح الأجسام المضادة محفزات إذا تم إنتاجها كــرد فعــل لوجود جزىء يخبئ حالة انتقال الركيزة، لقد تواجدت بسببه... هذا مقبول إلى حــد ما، ولكن هذه قصة أخرى.

---

(٥١)طبقة تحتية تتأثر بانزيم معين.

تصنيف حالة الانتقال إذا مطلب سابق لفهم آليات (الكتاليز Catalyse) الحفز ولكن أيضا لتركيبة المؤثرات المعدلة للتفاعل.

فى حالة البروتين، الذى يضم آلاف الذرات، تحديد الحركات المساهمة فى التفاعل الجزيئى ليس شيئا هينا، ولم يعد تفسير الأطياف مباشرًا كحالة الجزئيات ثنائية الذرة. فطاقة الحركة لهذه الحركات تتحدد مباشرة عن طريق أنماط تذبذب البروتين، وننتظر أن تكون هذه الحركات فى حدود الفيمتوثانية.

توجد فصيلة من الإنزيمات معروف لدينا بناؤها فى حالة الانتقال بفضل الطرق النظرية: إنها البروتياز[٥٢] الذى يفضل الشكل الرباعى الأوجه (Tetrahedral) لوصلة ربط الكربون الببتيدية[٥٣] (Peptide). أدت معرفتنا ببناء الجزيئات فى حالة الانتقال إلى السماح باستخدامها فى المجال الطبى: كمعيقات البروتياز. لا يذهلنا أنه إلى الآن لا يوجد دواء واحد فى السوق لم يتم إصداره إلا بعد خطوات علمية دءوبة ومنطقية كموانع البروتيار أو الببتيداز: موانع إنزيم التحويل (IEC) أو موانع البروتياز لفيروس الإيدز(HIV) قاعدة العلاج الثلاثى.

وبإعطاء الأمل فى إمكانية تصوير حالات الانتقال، تفتح الفيمتوبيولوجى المنظور أمام خطوات جذرية عن مفاهيم الموانع النوعية وقبل الوصول إلى هذه الإمكانية، علينا أن نتجاوز صعوبات جادة وهى: تطوير طريقة مباشرة لرؤية تشكيل البنية، وبالذات عن طريق الحيود السينى (X-Ray) الفيمتوثانى وأيضا تصميم طرق تزامنية على مقياس الفيمتوثانية للتفاعلات الإنزيمية فى قلب البلورة.

---

(٥٢) البروتياز إنزيم حال للبروتينات Proteases.

(٥٣) الببتيد من الببتون ويطلق عليه هضميد.

التصوير الحى للجزئيات على مقياس الفيمتوثانية سمح لنا بإثبات التصرفات غير المتوقعة لإنزيمات التنفس: عن طريق استخدام الحركة التوافقية للذرات من أجل فعالية أكبر للتفاعل

حياة كل الكائنات الحيهوائية[٥٤] (Aerobies) تعتمد على نوعية من الإنزيمات: الأوكسيداز، وأكثر خصوصية لليوكاريوت (Eucaryote)؛ السيتوكروم أوكسيداز. هذا الإنزيم هو الوحيد القادر على إيصال الإلكترونات إلى الأكسجين عن طريق الأكسدة – الذاتية بطريقة عكسية. هذه الطريقة مسئولة عن ٩٥% من استهلاك الأكسجين فى الغلاف الحيوى (biosphere). ويؤدى توقف عمل هذا الإنزيم إلى آثار ضارة على الخلية، وخصوصا عن طريق إنتاج شق كيميائى غاية فى السمية الهيدروكسيل (OH^-). وبعد حد معين من إنتاجه، تجتاز نظم إزالة السموم طاقتها فى العمل، فالإجهاد المؤكسد الذى ينتج عنه يتسبب فى باثولوجيا[٥٥] (Pathologie) متنوعة. هذه الحالة نجدها فى الفترة البعد – أزكيمية[٥٦] (Post-ischemique) فى انسداد مجرى الدم الشريانى بنسيج أو عضو (infarctus) للمايوكارديوم[٥٧] (Myocardium)، ولكن أيضا فى الأمراض المتسببة فى انحلال الأنسجة العصبية (neurodegenerative) أو بسبب الشيخوخة.

هذا الإنزيم يساعد على الإقلال من الأكسجين فى الماء عن طريق عوامل اختزال مكافئة أطلقها السيتوكروم C السائل. هذا الاختزال ذو الإلكترونات الأربعة يقترن مع تغيير موقع البروتونات من خلال الغشاء الميتوكوندرى[٥٨] (Mitochondrion). تبقى مركبات الأكسجين الوسيطة والأكسجين متصلة بالهيم (heme a_3) فى موقع محدد جدا. هذا الموقع يحتوى بجانب الهيم a_3،على ذرة

---

(٥٤)حيهوائى كائن عضوى يتكون من واحدة أو اثنتين من الخلايا التى تحتوى على كرات واضحة للرؤيا وجزئيات عضوية.

(٥٥)باثولوجى: علم دراسة الأمراض.

(٥٦)أنيميا متواجدة فى خلية معينة بسبب اعتراض الدم بداخل الأوعية الدموية.

(٥٧)مايوكارديوم (Myorcardium) هى منطقة العضلات الوسطى لجدران القلب.

(٥٨)الميتوكوندريون Mitochondrion هو خيطية غنية بالدهون والبروتينات والإنزيمات.

نحاس CuB. هذه الذرة تلعب دورا مهما فى التحكم فى دخول الربيطة (Ligand) إلى هذا الموقع أو الوسط.

الوصلات الثنائية الذرة: الأكسيجين O_2، النيتروجين أوكسيد NO، ومنوأوكسيد الكربون CO تستطيع أن تصنع وصلات مع حديد الهيم a_3 أو مع CuB ولكن الموقع النشط مكتظ بحيث لا يسمح باستضافة وصلتين.

الدراسات الحديثة عن ديناميكا الفيمتوثانية سمحت بتفسير آلية انتقال الوصلة (الكربون CO منو أوكسيد)، للهيم a_3 تجاه الـ CuB. الكربون منوأكسيد هو جزئ موصل وسيطى (transduction)[٥٩] للإشارة الصادرة بكمية ضئيلة من الكائن الحى. هذا الجزىء يمنع السيتوكرون -C- أوكسيداز، عن طريق تكوين مركب المستقر heme a_3- Co_3. وعند تتبع هذا التفاعل من خلال المنظار الطيفى الفيمتوثانى، أصبح فى إمكاننا إظهار آلية فعالة جدا، ألا وهى انتقال جزيئى خطير على حياة الخلية. ويحرر الإنزيم جزىء الكربون منوأكسيد من موقعه الأول بإعطائه نبضة توجه مساره نحو الموقع الثانى عن طريق حمايته من التصادمات مع البيئة المحيطة.

فى المثال الأخير، يصل الإنزيم إلى درجة تعقيد إضافية بخروجه من قاع منحنى الطاقة ويمنع الإنزيم انبعاث الجزىء الخطر على حياة الخلية، عن طريق استخدامه كمرسال.

نحو إزالة الفواصل بين النظم

السينما الجزيئية ليست إلا فى بداياتها. إنها ميدنيا بكماء، فى تكنولوجيا التصوير فى الطور الجنينى، فعدد الصور المتتالية لا يسمح لنا بإظهار السيناريو الحقيقى. وسوف نحصل على إمكانيات أفضل فيما بعد.

---

(٥٩)موصل وسيطىtransducare لانتقال المادة الجينية من كائن حى مجهرى إلى آخر عن طريق الإصابة الفيروسية.

إذن سوف يكون هدف الأعوام القادمة بناء فيلم الأحداث المؤدية إلى الحياة الخلوية، ثم تجميعها فى رسومات توضيحية.

سوف يعتمد هذا التجميع على مجالات بحث متنوعة جدا، مختلفة عن التى أدت تقليديا إلى تقدم بيولوجيا الخلايا أو الأعضاء. وانتقال آليات الفيزياء، ومن ثم اختراع آليات جديدة ومنها آليات جزيئية، وخروج مفاهيم جديدة تستدعى تطوير التآزر بين العاملين المطورين لمجالات منفصلة مثل: بيولوجيين خلويين (جزيئيين: فيزيائيين وكيميائيين ومهندسى البيولوجيا المعلوماتية (bio- information)... فى هذا الإطار سوف يصبح مفيدًا أن نخلق الظروف التى تهيئ تجميع جموع المتنافسين فى مكان واحد.

لماذا للجسيمات كتل؟[٦٠]

بقلم: دانيل تريل

Daniel TREILLE

ترجمة: د. هدى أبو شادى

مقدمة

الرد بطريقة شاملة على هذا السؤال المذهل ليس ممكنا الآن. ومع ذلك فهناك مجالات كثيرة فى طريقها للاكتشاف. وبعد تعريف قصير للكتلة، سوف نشرح حالة فهمنا الحالى لعالم الجسيمات، الملخصة فى النموذج المعيارى. المفاهيم والمبادئ التى سوف تقدم ستسمح لنا بالتحدث عن آلية نشك فى أنها مصدر تولد الكتلة: هى آلية هيجز (Higgs). سنقوم بشرح الفكرة التى تحتويها. وسوف نختبر خصائص الفراغ الكمى حتى نستطيع فيما بعد أن نعمق فهمنا، خصوصا فى حالة تعديل النموذج المعيارى للوصول إلى التماثل الفائق. سوف نستدعى اختيارات متفرقة ونلخص المنظور المفتوح لعدة تصورات جذرية. وحتى لا أسهب لن أشرح هنا أبحاث الهيجزبوزون الحالية أو فى المستقبل ولكن سوف ألخص حالة الأشياء.

عن ماذا نتحدث؟

نعرف كتلة الجسيم الأولى بالرقم m الذى يميز هذا الجسيم وسوف نعبر عنه بوحدات الطاقة: الإلكترون فولت eV وحاصل ضربها المليون (الميجا إلكترون فولت) MeV، والمليار (الجيجا إلكترون فولت) GeV وألف مليار (تيرا إلكترون فولت) TeV وعلى سبيل المعرفة فكتلة الإلكترون قيمتها 0.5MeV، وكتلة البروتون قيمتها حوالى 1GeV. لماذا نستخدم وحدة الطاقة؟ وما هى صلتها

(٦٠)نص المحاضرة رقم ٢١٢ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٣٠ يوليو ٢٠٠٠.

بالتعريف المتداول للكتلة، التى تعتبر مرجعا لمفهوم القصور الذاتى والجاذبية لأى نظام؟

فى قلب معجلاتنا[٦١] تتحرك الجسيمات بسرعات قريبة من سرعة الضوء c فى الفراغ وسوف نتخذ قيمة وحدة السرعة $c = 1$. وسوف نضطر لوصفها باستخدام قوانين الحركة لنظرية النسبية. ولكن لا ينبغى أن نرتعد عند ذكر نظرية النسبية.

يمكن وصف حركة جسيم عن طريق تعريف كتلته m وطاقته E[٦٢] ومتجه P[٦٣] كمية حركته (Impulsion). هذه الكميات مرتبطة عن طريق العلاقة[٦٤] $M^2 = E^2 - P^2$. يمكن أن تتغير قيمة كل من P،E ولكن قيمة m تبقى ثابتة. سرعة الجسيم هى $v = \frac{P}{E}$ إذا كان الجسيم فى حالة سكون فإن $E = m$ (v=P=0)، ونلقبها E_0 أى طاقة الجسيم فى حالة السكون. هذه المعادلة هى العلاقة الشهيرة جدا بـ $E = mc^2$ عند $c = 1$. الكتلة إذا هى كمية الطاقة التى تكمن بداخل الجسم عند السكون، وهذه إجابة السؤال الأول.

عندما يتحرك الجسيم، فإنه يمتلك طاقة حركة تساوى $E - E_0$. عموما بالنسبة للمقذوفات البالغة السرعة التى نستخدمها فى فيزياء الجسيمات، تكون الطاقة E كبيرة جدا بالنسبة لـ m: إذن يصبح كل من E و P عمليا متساويين فى نهاية المطاف. إلا عند الحالة الخاصة m 0= يصبح كل من $E = P$ و $v = 1$. يسافر الجسيم صاحب الكتلة الصفرية بسرعة الضوء ولا يمكن وضعه فى حالة سكون.

---

(٦١)معجلاتنا كبيرة أو تصادمية مثل LEP (إلكترون – بوزيترون) عبارة عن ميكروسكوبات تصل قوة تحليلها إلى واحد على ألف من الفيرمى (1fm=100m-13) وهو قطر البروتون.

(٦٢)القارئ المحب للهندسة يمكن أن يرسم مثلثًا قائم الزاوية له جانبان m،P ووتره E الجزء m ثابت والجزءان الآخران متغيران.

(٦٣)النبض أو الاندفاع بسرعة C ليس إلا كمية الحركة.

(٦٤)إنها بطريقة ما آلات لاسترجاع للزمن عن طريق التصادمات بين نوعين من الجسيمات وليس بطريقة عينية وذلك لإحياء الفيزياء التى تواجدت تقريبا 11-10 ثانية بعد الانفجار العظيم.

في حالة تفاعل اثنين من الجسيمات، فإن الطاقة الكلية (حاصل جمع طاقة كل منهما) وكمية الحركة الكلية (حاصل جمع متجهات كمية الحركة) تظلان كما هما في كل من الحالة الابتدائية والحالة النهائية (مبدأ بقاء الطاقة).

أما بالنسبة للسؤال الثاني، عن طريق استخدام معادلات يسيرة نستطيع أن نثبت إذا كانت سرعة الجسيم أو النظام صغيرة بالمقارنة بسرعة الضوء، حينئذ تستعيد الكتلة مسماها القديم الذي عرفته قوانين نيوتن ألا وهو $F = m \times a$[٦٥][٦٦].

تصبح الدقة... نقطة في الحال غاية في الأهمية. تاريخيا كان يظن أن الكتلة تجمع عدديًا: نعترف في العالم العيني بأن كتلة الجسيم عبارة عن حاصل جمع مكوناته، هذا بالتأكيد صحيح بالنسبة للجسم الإنساني المكون من مجموعة ذرات. يظل هذا صحيحا أيضا عند 10^{-8} للذرة التي تتركز كتلتها في النواة. بالنسبة للنواة، المكونة من البروتونات والنيوترونات تظل هذه الطريقة صحيحة إلى أقرب ~a%. أما للبروتون فتشكل هذه الطريقة خطأ دراميا: فكتلتا البروتون والنيوترون ليستا على الإطلاق حاصل جمع مكوناتهما (انظر إلى الرسم ١) لأن كتلة كل من الكوارك تحت (down) وفوق (up) تقريبا مهملة وبالنسبة للجلوون فهي صفرية. وهنا لا تصبح الكتلة الكلية حاصل جمع الطاقات. إذن مفهوم الكتلة على مستوى الجسيمات ليس على الإطلاق عبارة عن عملية جمعية. فالكون المرئي، المكون من البروتونات والنيوترونات يدين بكتلته إلى " الرقصة" المشتركة بين مكوناته.

أما بالنسبة لليبتونات والكواركات فهذا السؤال لا يطرح لأننا نعتقد أنهما أوليان ولكن من المحتمل أن يظهر لهما سلوك مختلف إذا اضطررنا يوما إلى إضافة صفة معقدة إليهما. سنكرس الفقرة التالية لشرح مصدر كتلتيهما.

---

(٦٥) a هي علامة العجلة (acceleration).

(٦٦) هي علامة القوة (Force).

نصف قرن من التجريب النشط فى فيزياء الجسيمات سمح لنا بإجراء اختزال على طريقة مندلييف منذ انتشار الجسيمات فى الستينات من القرن الماضى إلى مجموعة محددة من المكونات الأولية المشار إليها فى الرسم ١.

من جهة اليسار؛ الليبتون (Lepton) والذى يعنى الخفيف الذى يسير بحرية. تنقسم الليبتونات إلى الآتى؛ الإلكترون e^- ذى الأعوام المائة، والميون μ^- (Muon)، ميون كونى واحد فى يقطع يدك فى الثانية، والتأو τ^- (tau)، الذى تم اكتشافه منذ عشرين عاما وثلاثة نيوترينات مصاحبة لكل منهما.

ثم نأتى إلى الكواركات، الموجودة فى جسيمات الهادرون (الجسيمات المُنتجة فى التفاعلات القوية) حصلت جسيمات الكوارك على هذا الاسم من مسمياتها الإنجليزية مثل: فوق (up)u، وتحت d (down)، وغريب S (Strange)، وساحر C (charm)، وقاع (bottom)b، وأخيرا قمة t (top).

لم تستطع للأن القدرة الفائقة للمعجلات إثبات أحجام منتهية لهذه الجسيمات الأولية. هذه الجسيمات تظهر لنا كنقط عند مقياس 10^{-3} fm. وتنقسم هذه العناصر إلى ثلاث عائلات.

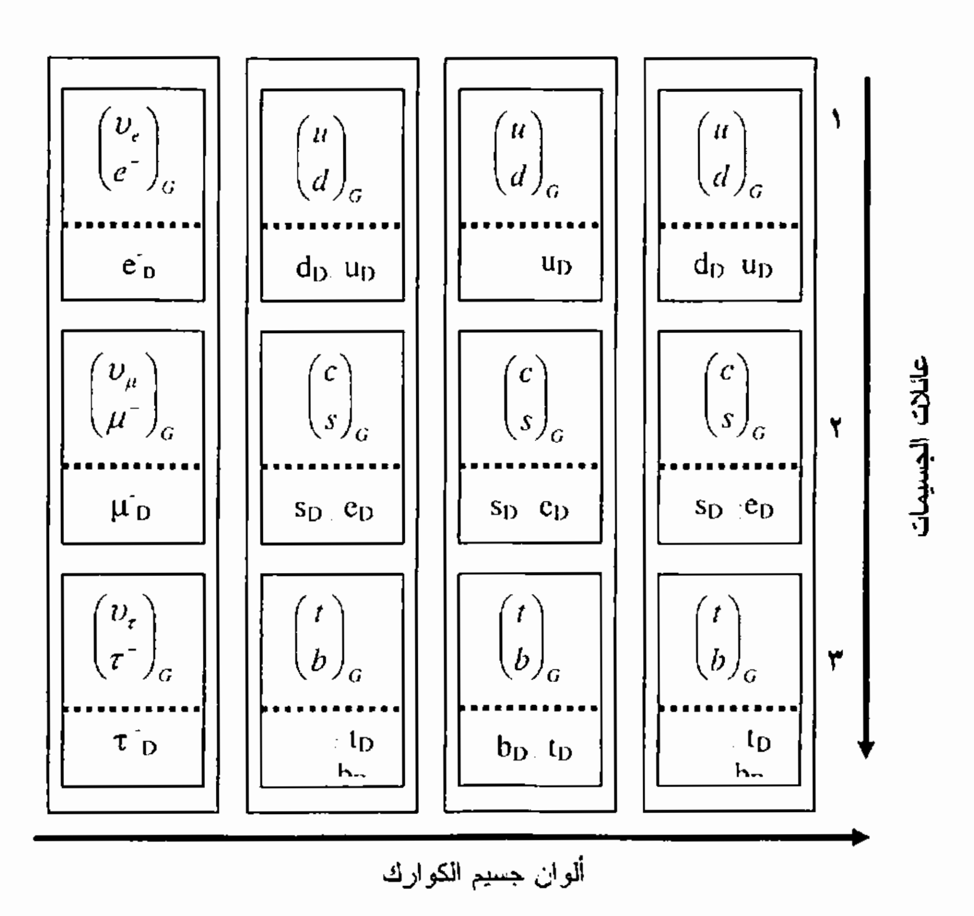
نتكون نحن والكون الحالى من العائلة الأولى. ويظهر الآخرون فى التصادمات الكونية الطبيعية وفى تجاربنا، لكنهم لعبوا دورا أكبر فى بداية الكون. وبفضل المفاعل التصادمى LEP فى CERN بجنيف، نعرف أنه لا توجد عائلات أخرى، على الأقل لها نيوترينو خفيف. ولن نتطرق إلى أسباب تكرار هذه العائلات ولكننا سوف نثير هنا بعض الفروض الخاصة بهذا الموضوع.

الكتل المشاهدة لهذه العائلات متفرقة بطريقة مذهلة[٦٧]: دون حتى أن تتكلم

---

(٦٧) كتل الليبتونات كالآتي: e- الإلكترون ~0.5MeV والميون ٣ ~106MeV والتاو ا~1.78GeV. أما بالنسبة لكتل الكواركات فهى كالآتى: فوق=4MeV وتحت ~8MeV والغريب 0.15GeV والساحر~1.2GeV والقاع~4.7GeV وأخيراً القمة~175GeV.

عن النتيوترينو[٦٨]، بين كتلة الإلكترون وكتلة الكوارك t يوجد فارق عددى يقــدر بـــ350000.



الرسم (١) مكونات المادة

(٦٨)يبدو أن التجارب الجديدة أثبتت أن للنيوترينو كتلة ضئيلة جدا ولكنها ليست صفرية. فى الواقع ما تــم قياسه هو فرق الكتلة بين نوعين من النيوترينو.

ومعلومة أخرى تأتى لتعقد الجدول. الجسيمات التى لها دوران مغزلـــى، أى التى لها عزم دوران زاوى ذاتى ومن المعتاد مقارنتها بالنحلـــة، لا تفيـــدنا هـــذه المعلومات عنها كثيرا لأن هذه الجسيمات عبارة عن نقـــط ولأن عـــزم الـــدوران الزاوى مكمى.[٦٩] الدوران المغزلى للمكونات يساوى ½ وحـــدة عـــزم الـــدوران الزاوى الأولى مما يجعله من جسيمات الفرميون (تبعا لإنريكـــو فرمـــى Enrico Fermi). هذه الجسيمات تتبع مبدأ بـــاولى للاســـتبعاد Principe d'exclusion ولا تقبل بأن يتواجد اثنان منها فى نفس حالة الطاقة. على طـــول انـــدفاع الجـــسيم أى حركته، يأخذ الدوران المغزلى القيمة ½ + أو ½-. سوف نستخدم صورة حلزون للشرح: فى الحالة الأولى الحلزون يتحرك مثل الجسيم فى اتجاه عقارب الـــساعة. ونلقبها بالحالة اليمنى. الأخرى ستكون الحالة اليسرى. أو نتخيل صورة أخرى: إذا كان إصبع الإبهام متجها إلى جهة حركة الجسيم، فالأصابع الأخرى لليـــد اليمنـــى سوف تلتف إلى اليمين. ونحو اليسار لليد اليسرى. إننا سوف نتحدث إذا عن مبـــدأ اللاتماثل المرآوى (chirality) من اليونانية (χεlρ) للحالات اليمنى أو اليسرى.

ونصادف هنا حدثًا غريبًا نـــستطيع أن نوضـــحه فـــى حالـــة النيوترينـــو. فالنيوترينو الأيسر عندما نراه فى مرآة يصبح نيوترينو أيمن. وبينمـــا تقـــدم لنـــا الطبيعة فقط نيوترينو أيسر لا يوجد نيوترينو أيمن! مثل حكايات مصاصى الـــدماء فى ترينسلفانيا، فالنيوترينو الأيسر ليس له صورة فى المرآة. إنها ظاهرة مـــشهودة لانتهاك مبدأ التماثل (الندية) Parity المكتشف ســـنة 1957 الخـــاص بالتفـــاعلات الضعيفة. هذا المبدأ أذهل عالم الفيزياء لأننا ظننا أن كل النظم الفيزيائية الحية لهـــا صورة فى المرآة هى الأخرى حية.

وسوف نذكر هنا العلاقة بين الكتلة ومفهوم اللاتماثل المرآوى، فمن الممكن أن تتضاعف الكتلة غير المهملة للجسيم عند مشاهد يجرى بسرعة أكبر منه (ولكن أقل من سرعة الضوء). وعندما يضاعفها يرى أن التماثل المرآوى للجسيم تغيـــر،

---

(٦٩)موجود على شكل مضاعفات لكم ثابت.

مثلا من اليسار إلى اليمين. إذا مفهوم التماثل المرآوى يعتبر صفة غير متغيرة. هذا المفهوم يصلح للجسيمات ذات الكتلة الصفرية، التى تسافر بسرعة الضوء ولا يمكن أن تتضاعف.

الرسم يوضح لنا حدثًا محيرًا أننا نرى من وجهة نظر التفاعلات الضعيفة، جسيمات الفرميون اليسرى تعيش فى أزواج مثل زوجى الإلكترون - نيوترينو أو الزوجين الكوارك S والكوارك C بينما جسيمات الفرميون اليمنى فرادى.

هذه الحالة تتغير فى حالة الفرميون - المضاد. إننا نسمى هذه الأزواج دبليت (doublet). ويمكن أن نشرح الحالة الجديدة كالآتى: إن الفرميونات كما توجد فى الزمكان الذى نعيش فيه توجد أيضا فى فضاء آخر نعتبره مجردًا أو داخليًا. ونمر من حالة إلى أخرى عن طريق الدوران فى الفضاء الداخلى والذى سميناه فضاء الأيزوسبين "الدوران النظيرى" (Isospin) الضعيف. فى هذا الفضاء، الفرميون الأيمن عبارة عن قيمة غير متجهة ولا يهتم بهذا الدوران. يا للغرابة!.

شىء آخر: تتميز الكواركات بخاصية ذات أهمية كبيرة. أنها تنقسم إلى عائلات مثل الليبتون، الحالات اليسرى لعائلة مكونة من أزواج (doublet) بينما العائلة اليمنى مكونة من اثنين فرادى. وزيادة على ذلك، فكل كوارك له ثلاثة تنوعات (الأعمدة الثلاثة) لها بقيم مختلفة. وأعطيناها شحنة جديدة سميت باللون.

هذه الصفة " اللون" ليس لها علاقة بمفهومنا الاعتيادى للون وسنستخدم الطريقة الرمزية لدواعى الشرح. وهنا نستطيع أن نقول إن جسيمات الكوارك فقط تعيش فى فضاء آخر مجرد ثلاثى الأبعاد. يسمى هذا الفضاء فضاء اللون وننتقل من لون إلى لون مختلف عند الدوران فى هذا الفضاء. شحنة اللون هى مفتاح التفاعلات القوية، المعاد صياغتها حديثا فى نظرية الديناميكا الكمية اللونية Chromodynamique.

القوى والبوزون

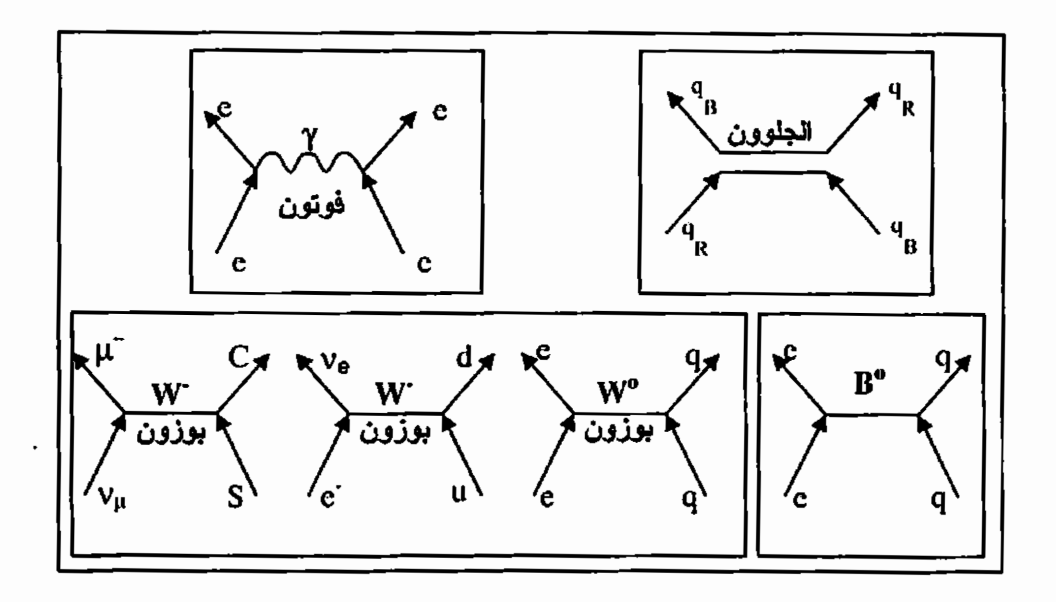
تبقى حديقة الحيوانات المليئة بالجسيمات الأولية مثقلة بالغموض مع أننا نفهم جيدا أنماط التفاعلات.

القاعدة سهلة: اثنان من الفرميونات يتفاعلان تبادليًا عن طريق تبادل بوزون. يأتى هذا الاسم من بوز (Bose) زميل آينشتين، والذى حدد لهذه الجسيمات دورانًا مغزليًا قيمته صحيحة.

وخلافًا لجسيم الفرميون من الممكن للبوزونات أن تتجاور وتتكدس طواعية فى مستوى الطاقة نفسه. لنعلم أن البوزون عبارة عن متجه لكتلة مهملة وله درجتا حرية، ونمطان من التذبذب العرضى والعمودى على الحركة. أما إذا كانت الكتلة غير مهملة، فسيكون له نمط ثالث: نمط التذبذب الطولى بطول الحركة.

والآن نقدم الرسم التوضيحى المبين فى الرسم ٢. هذه الرسوم التوضيحية تسمى رسوم فاينمان (Feynman) وتعطى للمتخصصين القواعد الحسابية للاحتمالات الأحداث التى تمثلها هنا. وسوف نسعد فقط باستخدامها لترشدنا فكريا.

يتفاعل اثنان من الفرميونات المشحونة كهربيا عن طريق تبادل فوتون: الفوتون يشعر بالشحنة الكهربية، ولكنه لا يحملها: إنه محايد. ونعلم أن كتلته أقل من 10^{-10} eV، ومن غيره لن تكون المجالات المغناطيسية للكواكب كما نشاهدها.



الشكل (٢)

رسومات توضيحية للتفاعلات التبادلية، الكهرومغناطيسية (إلى اليسار أعلاه)، القوية (إلى اليمين أعلاه) والكهربية الضعيفة في الأسفل.

ولأسباب وجيهة سوف نستفيض فيها، نظن أن كتلته صفرية، ووحدة الشحنة الكهربية الأولية e المعرفة أيضا بـ $\alpha = \frac{c^2}{4\pi} = \frac{1}{137}$ واحدة لكل من عائلة الليبتون والهادرون، مما يؤكد دقة الحياد الكهربي للمادة.

عموما، لقد تم إثبات أن التفاعلات التبادلية الكهربية الضعيفة بين جسيمات الفرميون ذات الشحنة الضعيفة والكهربية تتم عن طريق تبادل ثلاثي من جسيمات البوزون W، المشحونة والمحايدة؛ W^+،W^-،W^0 وبوزون محايد متفرد b^0 مقترن

بالفرميون[٧٠]. وتوضح الرسوم دور كل من W^- و W^+ والبوزونات المحايدة. فى الرسوم الأولى يحدث تبادل بين زوجين من شركاء تقارن أيسر مثلا، نيوترنيو إلكترون إلى إلكترون أو كوارك تشارم (ساحر Charm) إلى كوارك ستريتج (غريب Strange) وتؤدى هكذا عدة دورانات فى فضاء الدوران النظيرى الضعيف الذى تكلمنا عنه من قبل. وهى لا تتفاعل مع جسيمات الفرميون اليمنى، لأنها لا تحتوى على شحنة تناسبها.

أما البوزونات المحايدة فلا تؤثر على الفرميونات المتفاعلة معها. التبادل الأول مثال ينتمى إلى التيار المشحون والثانى إلى التيار المحايد. التيارات المحايدة تم إثباتها عمليا فى CERN سنة ١٩٧٣.

تعقيد صغير آخر: بينما يُسهل علينا عالم البوزونات المشحونة W^- وW^+ إنتاجهم واكتشافهم فإن عالم البوزونات المحايدة أكثر تعقيدا. فجسيمات البوزون الفيزيائية الموجودة فى الواقع هى مزيج بالمعنى الكمى للكلمة، فـ W^o وB^o عبارة عن Z^o وفوتون. وننتقل من زوج إلى آخر عن طريق عملية تحويل سهلة عبارة عن دوران بزاوية θ،[٧١] المسماة بزاوية المزج الضعيف. تبين لنا كحقيقة معملية أن الفوتون والبوزون Z^o من العائلة نفسها، ولكن كتلتيهما مختلفتان، فواحد كتلته مهملة والآخر كتلته مائة مرة أكبر من وزن البروتون. هذا هو الغموض الذى سوف نحاول أن نخترقه. إنها حالة انكسار للتماثل ومع أن المعادلات متماثلة فإن حلولها ليست متماثلة.

---

(٧٠) مع ثوابت التقارن g و/g بالترتيب يمتلك القارئ للأن اثنين من ثلاثة بارامترات فى النموذج المعيارى. الثالثة هى السرعة v ستظهر عندما نتحدث عن الهيجز بوزون.

(٧١) LEP قام بقياس θ فى الواقع مربع جيب θ ويساوى 0.2315. الاقتران الكهرومغناطيسى والضعيف يرتبطان ببعضهما البعض عن طريق المعادلة $e=-g\sin\theta$ مما يبين أن القوة التفاعلية الضعيفة ليست أكثر ضعفا من القوة الكهرومغناطيسية.

وأخيرا التفاعلات التبادلية القوية بين جسيمات الكوارك تحدث عن طريق تبادل بوزون آخر، نلقبه بالجلوون (gluon)[٧٢] اسم يتّحدث عن نفسه. إنهم زوجان من الكواركات ثنائى الألوان يتبادلان ألوانهما. أو بطريقة علمية، فإنهما يكوّنان ممتدًا (مربع له مدخلان) فى الفضاء اللونى، وعدد هذه البوزونات ثمانية، يمثل الدوران فى الفضاء اللونى تبادلاته مع جسيمات الكوارك الذى تحدثنا عنه من قبل.

وبينما يحس الفوتون بالشحنة الكهربية ولا يحملها فإن جسيمات الـ Z^o و W تحس بالشحنة الضعيفة وتحملها. وكذلك الجلوون، ثنائى اللون، يحمل الشحنة اللونية. هذا يعنى أن Z و W من جهة والجلوون من الجهة الأخرى ممكن أن تقترن فيما بينها كما سنرى، ما عدا الفوتون ليس له هذه الإمكانية. فى حالة الجلوون، تؤثر خاصية التفاعل الذاتى تأثيرًا مهما، لأنها تتسبب فى حصر جسيمات الكوارك والجلوون بداخل جسيمات الهادرون العادية.

النموذج المعيارى MS

يعتبر النموذج المعيارى MS حصيلة المبادئ والمعادلات التى شرحناها بالكلمات، لعالم الفرميونات والتفاعلات التبادلية التى تعمل بينهما. وبالرغم من تواضع التشبيه، فإنه يتحدث عن عرض العالم الفيزيائى بطريقة متقنة مفصلة لم يسبق لها مثيل[٧٣]، انه يسمح بطريقة دقيقة جدا بالتنبؤ بعدد كبير من الكميات الفيزيائية ويستعد الآن لمواجهة مفصلة مع التجربة. الـ LEP بالذات، اختبرته فى مواضع كثيرة. وحقق النموذج المعيارى MS نجاحات فى كل الامتحانات التى أداها إلى الآن.

إنه يتكون من كل من النظرية الموحدة للتفاعلات القيادية الكهرومغناطيسية والضعيفة، والنظرية الكهربية الضعيفة والتفاعل القوى فى نسخته الحديثة "نظرية

---

(٧٢)يأتى من كلمة glue غراء بالإنجليزية.

(٧٣)مقدمة بسيطة توضح فى أعمال جى كين G.Kane بالأخص التماثل الفائق الذى يوحى لنا بالأفكار الموجودة هنا.

الديناميكا" اللونية. لقد بيَّنا القرابة بين هذه القوى التى تنتج عن طريق تبادل البوزونات بين اثنين من الفرميونات.

ترتكز نظرية النموذج المعيارى على اثنين من المبادئ العامة.

الأول أن قوانين الطبيعة لا تتغير عند تبادل بعض الجسيمات المختلفة ظاهريا فى المعادلات. حينئذ نقول إن النظرية لا تتغير عند هذا التبادل.

ولقد لفتنا النظر لاحقا بأن الإلكترون - نيوترينو أو كوارك القمة (t) كوارك (b) القاع يعتبران بالنسبة للعالم أنظمة يسرى وأن الاثنين من مكونات نظام فريد. وأن كليهما قابل للتبادل. إذن معادلات نظرية الكهربية - الضعيفة لا تتغير بالنسبة إلى الدوران فى الفضاء المجرد المختص بها أو فضاء الأيزوسبين (الدوران النظيرى) الضعيف. وكذلك قوانين الديناميكا اللونية بالنسبة للدوران فى الفضاء اللونى عن طريق تبادل ألوان الكواركات. المطالبة بعدم تغيُّر المعادلات مع تبادل الجسيمات هو مطلب يجبرنا على فروض تهيمن على شكل النظرية وتنبؤاتها. فمثلا إذا كنا نعلم بوجود عضو واحد من زوج من الجسيمات كما هو مفترض، فلابد أن نستنتج أن الآخر موجود. وهذا ما يحدث فى الآتى؛ الكوارك c (Charm) استُنتِج عندما عُلم الكوارك S (Strange) وكوارك القمة (top)t تم الكشف عنه عندما عرفنا كوارك القاع b (bottom).

المبدأ الثانى الكبير لنظرية النموذج المعيارى تنص على أنه إذا وجد جسيم مثل الإلكترون يحمل شحنة أو عدة أنواع من الشحنات فإنه من المستحيل بناء نظرية كم صالحة بدون افتراض وجود مجال أو أكثر من مجال إضافى يتفاعل مع هذا الجسيم. من الآن فصاعدا سيألف القارئ كلمة مجالات الكم المصاحبة لها الممثلة فى الفوتونات، والبوزونات Z^o و W والجلوون. يأتى المبدأ الثانى كتبعة للمبدأ الأول عندما نفرض أن هناك لاتغيرًا موضعيا وليس عامًّا. وسنشرح هذا ، فلنتصور إلكترونًا يتحرك فى الزمكان وكثافة وجودة تتحدد بدالة مركبة $\psi(x)$ حيث تمثل x نقطة فى الزمكان، هذه الدالة لها طور $\phi(x)$. القيمة المطلقة للطور

ليس لها أهمية فيزيائية ولكن فرق الطور له أهمية. سؤال: هل نستطيع أن ننتقى اختياريا طور الإلكترون فى كل نقطة فى الفضاء؟

إجابة: نعم هذا ممكن، ولكن بشرط أن نقدم بجانب الإلكترون مجالاً، المجال الكهرومغناطيسى. إنه يمثل بث أو امتصاص الكم الممثل فى الفوتون الذى يعمل على تغيير الطور. وبعد أن "اخترعنا" الفوتون، أصبح من الممكن الحصول على نظرية كهروديناميكية غير متغيرة عند دوران طور الإلكترون اختياريا فى كل نقطة.

ينتج عن هذا نظرية الكهروديناميكية الكمية وكانت نجاحاتها فى التفسير والتنبؤ مدوية.

سوف ندرس زوجًا من الأنظمة اليسرى، مكونة من إلكترون - نيوترينو بطريقة مشابهة. وفى شرح التفاعلات التبادلية الضعيفة، نفضل أن تكون الحرية فى تبادلهما، أو بدقة أكثر، نريد حرية انتقاء أيهما أصلح الإلكترون أم النيوترينو فى كل نقطة بالفضاء بطريقة مستقلة.

الإجابة: نعم نستطيع الوصول إلى هذه الحرية، عن طريق "اختراع" البوزون W. فالإلكترون يصبح نيوترينو عند بثه W^- كما شاهدنا من قبل، أو أن كوارك غريبًا (S) يتحول إلى كوارك ساحر (C) عن طريق فرض أن المجال له كم W، نستطيع أن نبنى نظرية جميع معادلاتها غير متغيرة فى كل النقط عند الدوران فى فضاء الدوران النظيرى الضعيف، وهذا يفرض علينا شكلاً لصياغتها الرياضية. وهل ينبغى أيضا أن تصبح كتلة البوزونات المتجهة مهملة.

وكذلك بتقديم الجلوون ككم للمجال اللونى، نستطيع الحصول على نظرية للتفاعل التبادلى القوى معادلاتها فى كل نقطة لامتغيرة عند الدوران فى الفضاء اللونى.

هذه الحرية المدعاة التى تعرض شكل النظرية، سهلة المقال ولكنها تقودنا إلى "اختراع" أشياء جديدة: المجالات وكمها. ومن المذهل أنه أمكن التنبؤ بكل من Z ، W قبل اكتشافهما عمليا.

تماثل النموذج المعيارى أساسى لتماسك النظرية، ويتطلب أن تكون الجسيمات بدون كتلة. فى حالة البوزونات المتجهة، نتجنب استثارة المجال بطول اتجاه انتشار الكم (أى اتجاه الموجة الطولية التى لها آثار سيئة) أو بصيغة أخرى، النموذج المعيارى مبنى على مفهوم اللاانطباقية المرآوية، وكما رأينا، هذه الخاصية متغيرة ما عدا للجسيمات التى ليس لها كتلة. النموذج المعيارى كما شرحناه بنى لأجل عالم مصنوع من الجسيمات الأولية التى ليس لها كتلة. هذا ليس حال جسيماتنا. ولكننا من الممكن أن نجد نهاية سعيدة للقصة.

آلية هيجز Higgs

وبفضل الحرية المكتسبة فى تغيير دور الإلكترون فى كل نقطة، أو فى تبديل الشركاء الاثنين المكونين لثنائى دوران نظيرى ضعيف، أو تبديل الكواركات المختلفة الألوان، أمكن بناء النموذج المعيارى وكتابة نظرية رياضية متماسكة. للأسف، هذه النظرية الجميلة لا تصلح إلا للفرميونات أو البوزونات ذات الكتلة الصفرية. لازلنا إلى الآن بعيدين عن الواقع الفيزيائى. فلا يوجد شىء فى النموذج المعيارى يسمح بإدخال كتل القوى من الخارج لأننا حينئذ سوف نُفقد النموذج صفة اللاتغير الجميلة.

ولكن يوجد حل لهذه المشكلة يعتمد على "اختراع" شىء جديد يمنعنا بطريقة "متناقضة" من هذه الحرية.

يصبح الأمر مثيرا للاهتمام عند استرجاعنا حالة الكهرومغناطيسية بالتفصيل. بفضل الفوتون، نستطيع أن نغير طور الإلكترون عند كل نقطة، إلا عند اعتراض خاصية معينة للوسط المحيط. إنه بالضبط مثل الحالة التى تظهر فى الوسط الفائق التوصيل الذى نعلم أن الإلكترونات فيه بعد أن تتفاعل طفيفا مع

الشبكة الأيونية، تصبح ملتفة فى أزواج، مكونة زوجى كـــوبر Paire de Cooper وشحنتهما 2e. ويعتبر زوجا – كوبر مادة عينية[٧٤] Macroscopique.

كما أن فى كل نقطة فى الفضاء، تتداخل آثار عدد كبير مـــن هـــذه الأزواج مما يخلق مجالا يملأ المادة فائقة التوصيل وتكون النتيجة إغلاق الطـــور الممكـــن للإلكترون شغله فى هذه النقطة، أيضا بسبب واقعة جديدة، ألا وهى تواجد مجـــال لأزواج كوبر بداخل المادة فائقة التوصيل، عندئذ تـــصبح حريـــة تغييـــر طـــور الإلكترونات عند كل النقط مرفوضة حتى عند "اختراعنا" الفوتون.

ولهذا أثر واضح، فالفوتون يقترن بمجال زوجى – كوبر ويـــصبح ذا كتلـــة. إنها ظاهرة مايسنر (Meissner effect) بداخل المـــادة فائقـــة التوصـــيل، حيـــث لا يستطيع المجال المغناطيسى اختراقها ويضعف على مسافة قـــصيرة تـــسمى طـــول الاختراق، λ، وتكون فى حدود عشرة ميكرونات. كل هذا يحدث كما لو أن الفوتون لم يستطع أن ينتشر بداخل المادة فائقة التوصيل أكثر من مسافة λ (واكتـــسب كتلـــة تساوى $m\sim 1/\lambda$). ونذكر القارئ بظاهرة مايسنر بأنها تتسبب فى اســـترفاع المـــادة فائقة التوصيل فوق المغناطيس. تظهر فكرة الفوتون ذى الكتلة كما لو كانت هرطقة تناقض ما ذكرناه من قبل. ولكننا نتحدث الآن عن فوتون ليس حرا يتشابه قليلا مـــع كم المجال الكهرومغناطيسى بداخل الدليل الموجى. وتقول نظريـــة المـــواد الفائقـــة التوصيل إن الكتلة تتناسب مع الجذر التربيعى لكثافة زوج كوبر~ $\sqrt{d}$.

وفى هذه المرحلة نستخدم القليل من الرياضة الفكرية. يعتبر طـــور الدالـــة الموجية للإلكترون زاوية، ويمكن رؤية تغيرات هذه الزاوية على أنهـــا دورانـــات تنقل من نقطة إلى أخرى على دائرة محيطها فضاء أحادى البعد. وتلقب الدورانات بمجموعة (1) U للدوران.

---

(٧٤) الحجم المتعارف عليه فى حدود ميكرون. وحقيقة أن الزوج – كوبر المكون من اثنين من الفرميونات عبارة عن بوزون. أمر مهم للغاية لأن كل هذه البوزونات التى تقع فـــى المـــستوى الكمـــى تتفاعـــل بالطريقة نفسها.

ولنفكر الآن فى فضاء الدوران النظيرى بدلا من الفضاء الأحـــادى البعـــد. ونتصور أن هناك مجالا مماثلا لمجال زوجى كوبر، يحدد التوجه فى هذا الفـــضاء أو يمنعه ومن ثم تحدث الدورانات المشروحة من قبل[٧٥] التى تتسبب فـــى تبـــديل الإلكترون والنيوترينو على حساب امتصاص أو بث بوزون W.

وجد أن هذا المجال من الممكن احتواؤه رياضيا: إنـــه مجـــال الهيجـــز[٧٦] (Higgs) وأثره على البوزونات Z و W مماثل لأثر زوجى كوبر على الفوتون فى المادة الفائقة التوصيل فتكتسب الفوتونات كتلة[٧٧]. والمعادلة التى تعطى هذه الكتلة مشابهة لما ذكرناه من قبل. مثلا: $M_w = 1/2gv$ حيث تمثـــل g معامـــل الاقتـــران الضعيف للبوزون W و v هى كثافة مجال الهيجز أو كما نسميها القيمة المتوقعة فى الفراغ. وتعتبر ثالث بارميتير فى نظرية النموذج المعيارى MS وقيمتهـــا ~ 250 GeV. لابد أن يُختار مجال الهيجز كثنائى دوران نظيرى ضعيف حتى يتمكن من لعب دوره[٧٨]. يكون لهذا الثنائى من الكميات المركبة أربع درجات حريـــة: إنـــه مكون من أربعة أعداد حقيقية. ثلاث من درجات الحرية ملحقة (نستطيع أن نقـــول مأكولة) بالبوزونات Z و W التى تكتسب كتلتها هكذا. وتبقى الرابعة، فـــى عقـــل النموذج المعيارى على أنها جسيم عددى (لامتجه)[٧٩] علينا اكتشافه.

---

(٧٥)نسميها مجموعة الـــ SU(2).

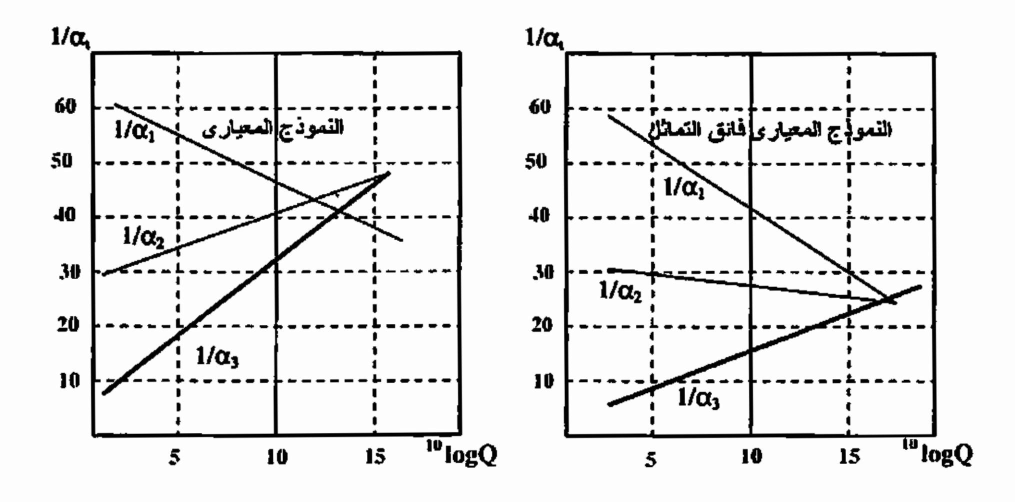
(٧٦)من اسم بيتر هيجز فيزيائى سكوتلاندى وأعطت هذا الفكرة اسمًا آخر تبعا لـــ ب. واندرســـون عـــالم فيزياء المادة المكثفة.

(٧٧)وكذلك المركب الطولى الذى يمثلها.

(٧٨)يشكل متجهًا فى فضاء الدوران النظيرى الضعيف بالنسبة له يكون اتجاه متجه الثنـــائى ثابتًـــا، هكـــذا نمنعه من حرية القيام بدوران اختيارى.

(٧٩)لابد له أن يكون غير موجه فى فضائنا. فإذا كان متجهًا ستعتمد كتلته على التوجه فى الفضاء وهو ما ينافى التجربة العملية.

توحيد ثوابت الاقتران فى النموذج المعيارى والنموذج المعيارى فائق التماثل الأدنى



الشكل (٣)

تطور ثوابت الإقتران (مقلوب الثابت) للقوى الكهربية الضعيفة (الاثنان العلويان) والقوية (السفلى). فى حالة التماثل الفوقى والتقارب شبه الكامل Q هى الطاقة ووحدتها GeV.

كانت نظرية النموذج المعيارى فى بداية الفصل عن مجال الهيجز، بناء جميلاً ولكنها كانت تصف عالمًا من الجسيمات ذات كتلة مهملة وليس عالمنا. وهاهى الأشياء كما ينبغى أن تكون: وما أنقذنا هو أن الفراغ الكمى (عند الطاقات المأخوذة) يتصرف كالمادة فائقة التوصيل.[٨٠] وكما فهم القارئ، فإنه فائق التوصيل بطريقة خاصة والتشابه مع المواد فائقة التوصيل العادية له حدوده.

(٨٠) لقد ذكرنا أنها فائقة التوصيل فى فضاء الدوران النظيرى الضعيف. وكالمواد الفائقة التوصيل الطبيعية التى تفقد هذه الخاصية عند درجات حرارة معينة مسماة الحرارة الحرجة والمشابه لها هو القيمة العددية للكمية U. ونلفت النظر أيضا إلى أن الفراغ الملحق بنظرية الديناميكا اللونية يعتبر نوعا آخر من التوصيل الفائق، المكافئ لظاهرة ميسز هو استحالة انتشار التفاعل اللونى إلى مسافات أكثر من ~ 1fermi : إنه ما يحدد حجم النيوكلون ويصبح مقدار الحرارة الحرجة فى هذه الحالة يقارب 200 MeV.

بصياغة أخرى، معادلات النظرية تمتلك تماثلاً جميلاً، ضروريا لتماسكها ولكن الفراغ لا يملكها.

الفراغ الكمى

بديهيا، الفراغ هو ما يتبقى عندما نزيل كل شيء إذا استطعنا فعلا أن نزيل كل شيء، فلا يبقى إلا العدم. بدقة أكثر، لأجل نظام معلوم ينبغى إزالة كل أشكال الطاقة الموجود فى صورتها المادية أو الإشعاعية. وهكذا يصل النظام إلى أقل مستوى للطاقة هذا سيكون من الآن تعريفنا للفراغ. هل هذا هو العدم؟

بالقطع لا! كل المجالات، وكل الفيزياء كلاهما حاضر فى الفراغ، ويكفينا القليل من الطاقة لإظهار كليهما وإخراج كل الجسيمات المعروفة للعب. ومن جهة أخرى فالفراغ "يغلى" بالنشاط (M. Jacobs). هذا النشاط من النوع الكمى. فالفراغ النشط للنظام يماثل قيمة متوسطة غير معرفة عند زمن طويل. ولكن إذا تابعناها على مدى زمنى قصير، سوف نظن أن طاقته تتذبذب كلما قصر زمن المتابعة وهذا بالاتفاق مع مبدأ اللايقين لهايزنبرج Heisenberg.

ويكون من الجيد أن نذكر القارئ بمقاييس الكبر التى تستخدمها $1\ fm = 10^{-13} cm$ ويتناسب مع زمن ~ $10^{-13}\ cm/c$، أو 3×10^{-24} ثانية. هذه الفترة تعطى (حرية الفراغ للتذبذب حتى حدود طاقة مقاربة للجيجا إلكترون فولت GeV). ويسمح هذا بظهور زوج من الميون والميون المضاد لفترة قصيرة جدا ويمكن تواجد زوج من البوزونات W خلال 3×10^{-27} ثانية تقريبًا. هذه الجسيمات الخابية تحتاج إلى الطاقة لإنتاجها حقيقيا وتسمى الجسيمات التخيلية.

نعلم التشبيه الذى يقارن الفراغ الكمى بالبنك الذى يعيرنا مقدارًا كبيرًا من المال (الطاقة) "بشرط" سداد مبلغ الاستعارة بسرعة. إذن لابد أن نستفيد سريعا من مقدم المال! تستطيع أن نمضى دون أن نذكر أننا فى الواقع الحالى لا نصل إلى هذه التذبذبات وأن الفراغ يظهر كما لو كان هادئًا فوق العادة. ولكن التفاعل

التبادلى بين اثنين من الجسيمات عند طاقات عالية، مثلا تصادم e^+-e^- كما فى الـ LEP يكون قصيرا جدا (Z^0 يتحلل فى غضون 3×10^{-25} ثانية). فى تجربة الـ LHC تقع تصادمات أكثر قصرا فى الزمن. هذه الأحداث تقع سريعا جدا بحيث تكون حساسة لتذبذبات الفراغ المهمة وهذا يعدل طفيفا القيم العددية لما نرصده من التفاعل. وعكسيا، عندما نقيسها بدقة كبيرة نستطيع أن نحصل على معلومات عن الموضوعات التى حدث بها التجسد الوقتى.

ولهذا لم يستطع الـ LEP أبدا إنتاج كوارك القمة بسبب الطاقة المستخدمة، ولكن هذا لم يمنعه من إعطائنا كتلته بدقة فائقة تضاهى القياسات المباشرة التى تمت فيما بعد فى معامل فيرمى Fermi Lab بعد اكتشافه. وأعطيت جائزة نوبل فى سنة ١٩٩٩ إلى كاتبى التطورات النظرية للنموذج المعيارى الذين ذللوا لنا هذه الحسابات القيمة(٨١).

و إلى جانب هذه التذبذبات الكمية، والتى سنوضح فورا عواقب أخرى لها، يقدم الفراغ مظاهر مدهشة تقع فى قلب موضوعنا: وُجِد أننا نستطيع الوصول إلى أقل مستوى للطاقة لنظام عندما يتبقى شىء ما بالداخل، مجال أو أكثر له قيمة متوسطة ليس مقدارها صفرًا حتى على مدار زمن رصد طويل جدا. الفراغ كما عرفناه ليس فارغاً.

الثوابت التى لم تعد كما هى

أثر آخر لهذه الخاصية للفراغ الكمى هى أن الثوابت، الكتل وثوابت التقارن التى قدمناها، ليست بالضبط ثابتة ولكنها تتطور مع مقدرتنا على تحليل معطيات الرصد، وهذا من الممكن فهمه، لأن تزايد القدرة على التحليل يزامن أوقات متاحة أقصر وبالطبع طاقات أعلى ويسمح بتذبذبات أكثر تتابعا تشير إلى جسيمات تخيلية

---

(٨١)نتحدث عن كل من إم. فيلتمان M. Veltman وجى تهوفت G.t'Hooft.

تزداد ثقلا مما يؤدى إلى حيود متدرج عن القيم التى تم قياسها. فى الواقع ، يعتمد مفهوم هذه التغيرات على نوعية الجسيمات التخيلية التى تظهر واقترانها. فى حالة التفاعل الكهرومغناطيسى ونتنبأ ونرصد أن قوة الاقتران - الشحنة - تزداد مع ازدياد الطاقة. نستطيع أيضًا أن نقول إنها تزداد بين اثنين من الفرميونات عند تناقص المسافة، كما لو أن هناك أثرًا حائليا يتخافت بين شحناتها.

هذا الأثر يعود إلى الزوج التخيلى الذى يظهر ويختفى، والذى يستقطبه المجال. هذا يشبه قليلا كما لو كان زوج الفرميونات مصباحين كهربيين مغمورين فى الضباب الذى يعوق الرؤية لكليهما كلما تباعدا عن بعضهما البعض. نتكلم الآن عن الشحنة وليس عن القوة، فيكون من الطبيعى إذن أن تتضاعف عند تضاؤل المسافة.

أما بالنسبة للتفاعلات القوية - للألوان - ما يحدث يدهشنا: نتنبأ ونرصد الأثر العكسى بسبب إحدى الصفات التى يتصف بها الجلوون وهى التفاعل الذاتى. عن الطاقات المنخفضة التى يختص بها الـ LEP، يصبح هذا الأثر واضحا.

عندنا قيمة صغيرة لمعامل الاقتران الكهرومغناطيسى الذى يزداد مع الطاقة واثنين أكثر كبرا منه للاقتران القوى الذى يتناقص وهذا ما يجعلنا نحلم بإمكانية التلاقى!

إن استقراء القيم عند طاقات عالية جدا، أكبر من التى نحصل عليها فى المعجلات، باستخدام القياسات البالغة الدقة لـ LEP مشروح فى الرسم (٣). للنموذج المعيارى SM فى الجهة اليسرى والنسخة المعدلة منه نلقبه بالنموذج المعيارى الفائق SSM التماثل فى الجهة اليمنى.

مقلوب ثوابت الاقتران فى النموذج المعيارى عبارة عن تقريب ولكنها فى النموذج المعيارى الفائق التماثل.

هذا التقارب، المشير بلا شك إلى نظرية التوحيد الأكبر (GU)، ينتج عند طاقات عالية جدا بمقدار GEV 10^{16}، ثلاث عشرة مرة مرتبة أكبر من التى نستطيع الوصول إليها تجريبيا.

تم إثبات هذه الواقعة سنة[٨٢] ١٩٩١ بدقة، وهو جدال ذو وزن لصالح حقيقة التماثل الفائق. هذا التماثل الذى يمنحنا إمكانية توحيد القوى الثلاث عند طاقات عالية.

ما التماثل الفائق؟

التماثل الفائق Supersymmetric (SUSY) إلى هذه الساعة ليس إلا تصور أسس بصلابة على التخطيط النظرى وهذا التصور يسمح بتقارب معاملات اقتران القوى ويقدم لنا تفسيرات لا يستطيع النموذج المعيارى أن يقدمها بالذات عن آلية هيجز، ويصبح هكذا المرشح الأفضل لشرح وجود المادة السوداء فى الكون. وإذا ثبتت صحة هذه النظرية، ننتظر اكتشاف طيف من الجسيمات الجديدة وفى غضون هذا تبقى أسئلة أساسية معلقة. لماذا توجد ثلاث عائلات من الجسيمات؟ لماذا هذه الكتل ليا هذه القيم؟ فتح التماثل الفائق الطريق أمام نظرية أكثر طموحا، ألا وهى نظرية الأوتار الفائقة التى سنتحدث عنها سريعا، والتى من الممكن أن تحمل مفتاح حل هذا الغموض.

فى النموذج المعيارى MS، اللاتماثل بين المكونات - الفرميونات - ومتجهات القوى - البوزونات كامل ويميز بين الجسيمات والأدوار غير القابلة للاختزال. ومن المدهش أن تقدم الرياضيات لنا إمكانية إحداث التماثل وكتابة معادلات لا تتغير مع التعويض بأى من الفرميونات أو البوزونات. ولهذا ينبغى أن نخترع مجموعة (جمهور) مرآوية[٨٣] للجسيمات بحيث يكون لكل فرميون معروف (بوزون) آخر (على الأقل) بوزون (فرميون) شريكا له. هذه الجسيمات المرآوية لم يتم اكتشافها ولا تمتلك الكتل نفسها التى يمتلكها شركاؤها. التماثل الذى يتبعها لا

---

(٨٢)بفضل المعطيات الدقيقة جدا للـ LEP على ثوابت الاقتران والحساب المتقن للمنحنيات وتطورها كدالة فى الطاقة.

(٨٣)شريك البوزون يسمى مثله مع نهاية - أينو. كالفوتون - فوتينو والجلوون - جلوينو. أما شريك الفرميون فيكون كما هو مع بداية S بخالا Top تصبح S.

يملك إلا أن ينكسر. مجموعة الجسيمات التى تتبأ بها التماثل الفائق تختلف عن النموذج المعيارى، ومن ثم الظواهر الناتجة عن تردد الفراغ ونظرية تطور القيم عندما تغير المقاييس تصبح مختلفة. وشاهدنا هذا جليا فى ثوابت الاقتران. الأثر الآخر الملاحظ هو أن ترددات الفراغ التى تتسبب بحيود قاس لكتلة بوزون الهيجز تجاه كتلة نظرية التوحيد الكبرى تعوض الآن بترددات تشير إلى الشركاء وتتداخل تداخلاً تدميريًا مع الأولى، ماحية تقريبا الأثر، ومع ذلك ينبغى أن لا تكون كل هذه الكتل كبيرة جدا فى حدود الـ TeV أو أكثر.

وفضيلة أخرى لنظرية SUSY، فى نسختها الحالية هى أنها اقترحت أن وجود جسيم فى الكون فى حالة تحجر من الممكن أن يشرح كل الكتلة المخبأة أو جزءًا منها وطبقا لـ LEP، إن وجد هذا سوف يكون أكبر من 40 GeV تقريبا.

ولكن ما يهمنا هنا هو الحالة الخاصة لآلية الهيجز بنظرية التماثل الفائق. فمن جهةSUSY تشرح "لماذا"، بينما ينحصر النموذج المعيارى فى شرح "كيف". ومن جهة أخرى، تتنبأ بالنسبة لقطاع الهيجز بمفهوم نظرى دقيق، محدد بوجود عدد من بوزونات الهيجز (خمس فى النسخة الأدنى) ضرورة أن تكون كتلة واحد أو أكثر منها صغيرة جدا (خفيفة).

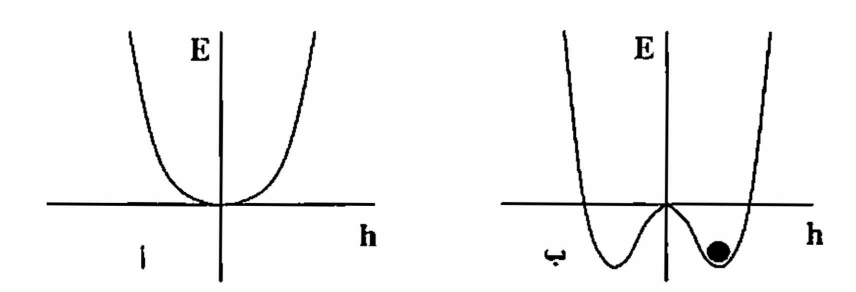
آلية هيجز من "كيف" إلى "لماذا"

لنعيد تعريف الفراغ على أنه الحالة ذات الطاقة الأقل فى الكون. فى النموذج المعيارى، نضيف مجالاً للهيجز بطريقة مميزة له فقط بدون أن ننزعج ونخترع له مصدرًا.

هذا المجال h يضاعف كثافة طاقة الكون، والنموذج المعيارى يفرض أن الزيادة فى الطاقة توصف بالمعادلة.

$$E = \mu^2 h^2 + Ah^4$$

حيث إن لـ A قيمة موجبة (هذا كل ما ينبغى أن نعرفه) إذا كان لـ μ^2 و A قيم موجبة، سيقتنع القارئ بسهولة أن E تتزايد بتزايد h بدءًا من الصفر (الرسم ٤ - ا).



الرسم (٤)

تغير دالة الجهد (الطاقة) مع μ^2 الموجبة إلى اليسار، ومع μ^2 السالبة إلى اليمين

مبدئيا، سوف نعتبر μ^2 مربع كم مجال الهيجز. قام النموذج المعيارى بخطوة إضافية: فرض أن الكمية μ^2 سالبة ! مربع كتلة سالب، سوف نندهش إذا فكرنا بالمفهوم الكلاسيكى، لذا فنحن نناشد القارئ بالصبر لوهلة.

إذا كانت μ^2 سالبة، سوف يكون مقنعا أن E تبدأ دائما بالتضاؤل عندما تزيد h بدءًا من الصفر. وفيما بعد تبدأ الأمور فى الانقلاب، وتأخذ E الشكل المبين فى الرسم (٤-ب)، والتى لا نستطيع أن نرسمها بالضبط، حيث إننا لا نعلم μ^2 و A. ويمكن أن نقدمها على أنها مقطع جانبى من منظر طبيعى لواد، فإذا تركنا كرة، سوف تتدحرج إلى قاع الوادى فى حالة الطاقة الأدنى والدُنيا[٨٤]. وفى هذه الحالة نرى أن القيمة الصغرى للطاقة نحصل عليها فقط عند h تساوى الصفر. ولكن

(٨٤) يمكن للقارئ أن يتخيل أن الرسم ٤-ب ثلاثى الأبعاد. للنقط السفلى تصبح طوقا. ويمكن للكرة أن تنزلق فى أى مكان، هذا الطوق (تماثل دائرى للجهد). فى النهاية سوف تنتهى لنقطة تكسر فيها هذا التماثل.

القيمة الصغرى يمكن الحصول عليها بدون أن تساوى h صفرا. نتصور أن الكون فى حالته الفراغية ممتلئ بمجال الهيجز وبقيمة نتوقع أن لا تكون مهملة.

جسيمات النموذج المعيارى يمكن أن تتفاعل مع مجال الهيجز بينما لا يفعل هذا كل من الفوتون والجلوون. كل من يتفاعل معه يكتسب كتلة. كل الكواركات واللبتونات المشحونة وكذلك بوزونات Z و W، تحصل هكذا على كتلتها عن طريق تفاعلها مع مجال الهيجز بطريقة تصويرية، يمكن أن نقول إن التفاعل مع مجال الهيجز الذى يملأ الفراغ كالمشى فى الماء بدلا من المشى فى الهواء: لابد أن نبذل قوة أكبر "كما لو كانت كتلتنا أثقل".

النموذج المعيارى يعطى آلية هيجز شرحا رياضيا دقيقًا. وواقعة أن الفوتون له كتلة مهملة شىء سهل إثباته. وكيفية التنبؤ لكل من بوزون Z، W هى بالضبط ما سنشرحه فى الآتى: حسبت قيمها بطريقة صحية ودقيقة ثم أثبتت التجارب فى CERN وجودها وصحتها.

وبالنسبة للفرميونات، يصبح شرح مصدر كتلتها عند التفاعل مع مجال الهيجز مقبولاً أيضا. وكلما زادت تفاعلاتها مع هذا المجال كلما ازداد ثقلها. ومع ذلك لا نستطيع أن نتنبأ بالكتلة التى تكتسبها. لا تقوم آلية هيجز إلا بإحلال المجهول من كتلتها إلى المجهول من شدة اقترانها مع مجال الهيجز.

ويبقى إذن النموذج المعيارى (ونظرية التماثل الفائق لا تغير شيئًا)، نظرية فقط فعالة (effective)،[٨٥] يعنى نظرية غير كاملة، لأنها غير قادرة على التنبؤ ببارامتراتها من تلقاء نفسها، وينبغى أن نأتى بهذه البارامترات من الخارج.

ومع أننا اخترقنا مفهوم الفراغ الكمى وفهمنا أنه يحتوى فى كل نقطة على كل الفيزياء القوية، رجعنا إلى الفكرة التى أثبتت تجريبيا بتغير الثوابت الفيزيائية والوزن والاقتران التى تصف عالم الجسيمات مع الطاقة. هذا يمكننا من فهم الحالة

---

(٨٥)نظرية فعالة ومقبولة فى حدود معينة للطاقة. ومن ثم لابد من استكمالها بنظرية أكثر شمولية.

المحرجة التى تتسبب فيها آلية هيجز التى تحدثنا عنها. ورأينا أن إضـــافة مجـــال الهيجز والتعبير عن الطاقة فى نظرية النموذج المعيارى هما طريقة تـصلح لهـذه الحالة فقط.

وبالذات لابد لنا أن نتقبل أن مربع الكتلة سالب ! فروض SUSY من جهة، وواقعة تغير الثوابت من جهة أخرى، يشكلان بالعكس شرحًا ممكنًا لما يحدث.

وفى الحقيقة أنه مقبول أن نظن عند طاقات عالية، حيـث تعـرض SUSY نظرية توحيد القوى، أن الطاقة المصاحبة لمجال الهيجز لها بالفعل التعبير المقترح أدناه مع وجود حد يمثل الكتلة μ^2 موجب. الحدث المدهش هو أننا إذا بـدأنا مـن هذا التعبير ونحسب تطور حد الكتلة (فى الحقيقة ينبغى أن نقدم اثنين فى (SUSY) عندما تتضاءل الطاقة، سوف نلاحظ (واحدًا من الاثنين) أنـه يتـضاءل ويـصبح سالبا عند الطاقات التى تهمنا. فمن الطبيعى إذا أن يكون هكذا والاختيار الذى ليس له أساس أثبتت صحته.

على العموم لكى تعمل هذه الآلية ولكى تصبح الكتلة سالبة ينبغى أن يكـون تطورها، الذى تسببت فيه الجسيمات التخيلية قويًا، مما يشير إلى أن كواركًا قمـة top، والذى يسود أثره على الحدث يصبح ثقيلا جدا. وفى الوقت الـذى تـم فيـه استنتاج هذا، لم تكن كتلة كوارك "قمة" top معروفة، ونستطيع القول بـأن التبنـؤ بقيمتها الكبيرة تم عن طريق فرض آلية الهيجز كما شرحنا.

ليس هذا المكان المناسب لرسم وجه روبوت بوزون الهيجز. يسيطر نمـط التحلل لكوارك القاع – كوارك القاع المضاد على مجالات الكتلة المستكشفة حاليـا فى تجربة LEP. ومنذ مدة قصيرة تم استبعاد وجود بوزون أخف مـن 113GeV. وقدمت لنا النسخة المبسطة من النموذج المعيارى الفائق التماثـل منطقـة الكتلـة الأدنى من 130GeV، حيث تتواجد الخصائص الملتهبة للاستكشافات الحالية.

الطريقة التي وصف بها مجال الهيجز بالتشابه مع المجال المصاحب لزوجي كوبر (الذي نعلم مصدره) تفتح الباب أمام احتمالات أخرى. حتى عندما ننظر إلى زوجي كوبر على أنهما عبارة عن اقتران بين اثنين من الإلكترونات، أي اثنين من الفرميونات التي عند اقترانها ببعضها البعض تصبح بوزونًا. بالضبط كما لو أننا نتحدث عن جسيم أولى ولكنه مركب. لذا فمن الممكن أن يكون هذا حال بوزون الهيجز، أو ما سيحل مكانه. ومع ذلك استطعنا تحويل تصورنا للجسيمات إلى حقيقة مثبتة فى فيزياء الجسيمات. فمثلا النيوترينو، والجسيمات المضادة وبوزونات W،Z وكوارك الساحر C وكوارك فوق Up تحولت من جسيمات تخيلية إلى حقيقة.

وأيضا لأن العكس لم يحدث، فلابد لنا أن نعترف أنه مع حالة بوزون الهيجز سيكون علينا أن نكتشف جسيمًا أو جسيمات أولية كما شرحنا من قبل. وزيادة على ذلك فإن التماثل الفائق إذا تطابق مع الواقع سوف يسمح بوجود قيم لا اتجاهية (عددية) أولية.

وتعتبر إحدى مميزات الهيجز بوزون هى إنقاذ النموذج المعيارى من كارثة الوصول إلى (أو تعدى) طاقة فى حدود المائة GeV. بدونها يصبح احتمال تفاعل البوزونات الوسيطة تباعديا عندما تزداد الطاقة. إذا لم يتواجد فلابد أن يتواجد شيء آخر للعب دور الوسيط. نتصور أنه لابد من تواجد نوع جديد من التفاعل. من الممكن أن يكون هذا نوعًا جديدًا للتفاعل القوى بين بوزون الـ Z ، W، مما يؤدى إلى تولد غير معيارى لهذه البوزونات فى أزواج بداخل الأجهزة التجريبية التى سنستخدمها فى المستقبل (LHC ومصادمات الليبتون التالية). عموما من الممكن خلق جيل جديد من الفرميونات التى تتفاعل عن طريق التفاعلات القوية بسبب شحنتها الجديدة. وظننا فى بادئ الأمر أننا نستطيع فى هذا الجديد الاستلهام بتفاعلات الألوان، ومن ثم حصلنا على الأسماء التالية التكنى لون (Technicolor)

أو التكنى فرميون (Technifermion). هذه التفاعلات القوية تخلق حالات مرتبطة بالتكنى فرميونات التى ستلعب بدورها دور بارامتر النظام بالضبط كما يلعبه زوجا – كوبر ومجالهما فى المواد فائقة التوصيل.

يصبح الموضوع غاية فى التعقيد، إذا رغبت هذه النظريات فى شرح مصدر كل الكتل. لا يمكن أن ننقل بسهولة هذه القوى الجديدة من شكل قوة اللون ونكتفى بإزاحتها إلى مقياس كتلة أكبر. لا تتسم نسختها الأكثر سهولة بالتوافق مع القياسات الدقيقة المذكورة أعلاه: ونستطيع لوم عدم ملاءمة طرق الحساب فى هذه النظريات للكميات التى نبحث عنها. ولكن هذا لا يمدد أبدًا صلاحيتها حتى لو أنقذها وقتيا.

إنها لا تمتلك القدرة على التنبؤ الدقيق كما هو الحال بالنسبة لبوزون الهيجز فى نظرية التماثل الفائق. ويمكننا أن نقول إن أيا من هذه النسخ المتجانسة لم يستطع أن يكون قاطعًا بالكامل. وفى المقابل، بما أنها تفترض وجود "طبقات" أخرى فى نظام الجسيمات الأولية وأنماط قوى جديدة، فإنها تستطيع أن تشرح أحداثًا لا تستطيع نظرية التماثل الفائق بنفسها أن تشرحها.

عمليا، البحث عن إمكانية تواجد التكنى ألوان يتشابه كثيرا مع حال الهيجز بوزون. ولكن "تأشيرة" الجمال تبقى أساسيه، ونظل نبحث عن إشارة لإنتاج أزواج من الجسيمات الجديدة[٨٦] الغنية بالجمال، أو إنتاجها المصاحب لبوزون W. ولكن لا يوجد ما يدلنا عند أى كتلة نستطيع إيجادها. وفى تجربة الـ LEP، حيث توجد حدود معينة للكتلة، لابد أن نطبق سياسته "عامود الإنارة"[٨٧].

---

(٨٦)إنها مثلا التكنى – بيونات التى تنتج عند تحلل تكنى دوره ثم يتحلل إلى كواركات قاع – قاع مضاد.

(٨٧)أن تعتمد على أنه عندما نفقد مفاتيحنا فى مكان ما فى الظلام لابد أن نبحث عنها تحت عامود الإنارة؛ حيث إنه المكان الوحيد الذى يحتمل أن يصيبنا الحظ فيه ونجدها، وهذا ممكن أن يصلح لموضوع آخر.

حتى لو تم إثبات التماثل الفائق، لن يكون هذا آخر المطاف لأنها من الممكن أن تكون نظرية فعالة بالمعنى الذى شرحناه. ولكن لابد أن نمدها من الخارج بالباراميترات التى لا تستطيع أن تحسبها بنفسها. ومن بين هذه الباراميترات مثلا كتل الفرميونات. وحتى لو استطاعت نظرية التماثل الفائق إيجاد علاقة بين آلية الهيجز بوزون والقيمة المرتفعة لكتلة كوارك القمة، فإنها لن تشرح سبب ثقل كوارك القمة (top). من الواضح أن حلم الفيزيائيين يظل هو البحث عن نظرية "أولية" تسمح بحساب كل شيء ولا تحتاج إلى بارمترات قادمة من خارجها.

نظرية مثل هذه، هل هى فى متراءى البصر؟

البعض يشير إلى نظرية الأوتار الفائقة التى تتراءى أمامنا.

طبقا لهذه النظرية[٨٨]، الكون مصنوع ليس من نقاط ولكن من أوتار صغيرة. وتصبح أنماط التذبذب الرنينية المختلفة هى المصدر المهجرى لهذه الجسيمات، وكتلها وشحناتها. والمرور من نقطة تجريد الأحداث غير المرحب بها إلى جسيمات أولية ذات حجم منته هو خطوة كبيرة للأمام لحل المشاكل الرياضية التى تحيط النظرية فى جوار قيمة ثابت بلانك (Planck)[٨٩]. وحد الصغر يحتاج إلى تعليق: طول هذا الأوتار فى حدود ثابت بلانك، مقياسها مثل عشرين مرتبة كبر أعلى من مقياس البروتون وسبع عشرة مرتبة كبر فوق مقدرة المعجلات على التحليل. نرى جليا أن إمكانياتنا التجريبية مازالت غير قادرة على تناولها عمليا! ولكن توحيد عالم الجسيمات أمر مدهش، لأن كل نوع من الجسيمات ليس إلا نغمة

---

(٨٨) انظر مثلا الكتاب الرائع لبرايان جرين، الكون الأنيق (The elegant Universe) واستشعرنا منه كلمة موسيقى الأوتار.

(٨٩) عند هذا المقياس، تأسر قوة الجاذبية بين الجسيمات الأخرى ذات الشدة والمشكلة هى أننا إلى أن وصلنا إلى نظرية الأوتار لم نكن نملك نظرية ترضى كلاً من مبادئ النسبية العامة التى تصف الجاذبية ونظرية الكم التى تنطبق على الجسيمات.

أو مجموعة هارمونية لنظام يتذبذب على أنماط مختلفة. الجسيمات هى "موسـيقى" الأوتار.

نظرية الأوتار تحتاج إلـى أبعـاد إضـافية[٩٠] أو أبعـاد زائـدة (extra-dimensions). إنها تفترض أن الأبعاد ستة، مما يجعل الأوتار تعيش فى عـشرة أبعاد. هذه الأبعاد الزائدة لابد أن تكون "ملتفة" recroquevillee، أى مضمومة فى حجم صغير حتى نستطيع أن نبرر سبب عدم رؤيتها. فإذا كان طولها يساوى ثابت بلانك، فهى فوق وخارج نطاق الاكتشاف بالمعجلات[٩١]. وهكذا لن يدهشنا أننا لـم نشاهدها.

عندما ينتقل الوتر متذبذبًا، تلعب الأبعاد الزائـدة دورا فـى تحديـد أنمـاط التذبذب الرنينى كما لو كان الشكل المعقد لآلة نفخ يحدد درجة رنينهـا الخاصـة، بالذات توبوجرافية هذا الفضاء ممكن أن تحدد سبب هـذا العـدد مـن عـائلات الجسيمات. ومن ضمن كل الأشكال الممكنة لفضاء سداسى الأبعاد، لابد أن تحـدد أيًا منها الأصلح، كالذى صنعته الطبيعة. ثم ينبغى لنا إيجاد الطـرق التكنولوجيـة لحساب القيم التى تهمنا، ككتل الجسيمات. ومع أننا مازلنا بعيدين، لكنه لـيس مـن المستبعد أن نصل إليها.

لقد أيقظت الأوتار الفائقة الاهتمام بالأبعاد الزائدة وأصبح موضـوع إعـادة استكشاف فيزياء الجسيمات صيحة. ويدور هذا حول إدخال الأبعـاد الزائـدة فـى النظرية ودراسة الآثار المترتبة على أن مختلف أنواع الجسيمات يمكن أن يتواجـد فى فضاءات مختلفة الأبعاد، ومن ثم تؤثر عليها قوى مختلفة. وشـدة القـوة كمـا نراها فى الزمكان الرباعى الأبعاد، ليست بالضرورة شدة القوة الحقيقية: إذا كانـت تعمل فى فضاء له أبعاد أكبر، سوف تظهر أضعف مما تكون فى الحقيقة. وممكن أن نتخيل أن الجاذبية ليست قوية جدا كما تظهر، ولكنها تعمل فى فضاء له أبعـاد

---

(٩٠) وهذا ليس غريبا بالنسبة لوجود هذه الفصائل المجردة التى ذكرناها على مدار شرحنا.

(٩١) حتى نصل إلى مقياس ١٠٠ ميكرون تقريبا من الممكن أن لا نلاحظها.

أكثر، وليس من المستبعد أن تصل نظرية التوحيد الكبرى إلى مرادها عن طريق هذا السيناريو. كل الاحتمالات ممكنة، ولقد اقترح أيضا ابتكار المركب المكافئ لبوزون الهيجز عن طريق استخدام الجسيمات والقوى الموجودة فقط في نظرية النموذج المعيارى على شرط الاعتراف بأن مجالات النموذج المعيارى تنتشر بطريقة مناسبة فى الأبعاد الزائدة المنتقاة جيدا[٩٢].

ولن يفوت على القارئ أن يستنتج أننا دخلنا فى مجال التخيلات ولكنها تستحق العناء، ولنبين أن الأوتار الفائقة بالذات تسمح بدراسة علم الفلك لما قبل الانفجار العظيم[٩٣]، والتحضير لإجابة السؤال العتيق الشرعى عن ما الذى كان قبل هذا![٩٤]

هذا العرض يعتمد كثيرا على الأعمال الرائعة لزملائى موريس جاكوبMaurice Jacob وأوجو آمالدى Ugo Amaldi. وكتابان جديدان غاية فى التشويق هما: "الكون الأنيق" لبرايان جرينى Brian Greene والتماثل الفائق لجوردن كين Gordon Kane. وأكن كل التقدير لزملائى فى تجربة LEP، بالذات لوك بابى Luc Pape والفائدة التى عمت من المساعدة المستنيرة لفليسيتاس باوس .Felicitas Pauss

---

(٩٢)وبالخصوص كلمة حجم كبير يعبر عنها فى مقياس الطاقة بالتيرا إلكترون فولت.

(٩٣)نخص الأعمال التى قام بها Veneziano ، CERN G واحد من أباء نظرية الأوتار.

(٩٤)من القديس أوغستين إلى يومنا هذا: الإجابة كانت هذا السؤال ليس له معنى لأن الزمن ولد مع العالم، ورد آخر نرده الآن: هذا السؤال ليس له معنى لأنه وُجد دائما.

استكشاف فى قلب العالم الكمى[٩٥]

بقلم: سيرج هارش
Serge HAROCHE

ترجمة: د. هدى أبو شادى

مائة عام من الفيزياء الكمية

فى سنة ٢٠٠٠ بلغت الفيزياء الكمية مائة عام. فى سنة ١٩٠٠، حتى يستطيع بلانك (Planck) أن يفهم خصائص الإشعاع الصادر من المواد الساخنة، قام باقتراح التصور المشهور بأن تبادل الطاقة بين المادة والضوء يتم عن طريق كمات[٩٦] (quanta) دقيقة وليس بطريقة متواصلة. استخدم آينشتين فيما بعد (خمسة أعوام) هذه الفكرة عندما أشار إلى أن الضوء نفسه مكون من حبيبات دقيقة سماها "الفوتون". وهكذا استطاع عن طريق هذه الفكرة أن يشرح ظاهرة الكهروضوئية، أى بث الإلكترونات من سطح معدن سلط عليه الضوء. وفى الأعوام العشرين التالية، حاولت نظرية الكم فهم الطبيعة على المقياس الذرى، وتطورت بفضل استخدام الفروض الجريئة والبديهية الخلاقة التى قام بها نيلزة بوهر (Niels Bohr). فى سنة ١٩٢٥ و١٩٢٦، وصل كل من هايزنبرج (Heisenberg)، وشرودينجر (SchrÖdinger)، وديراك (Dirac) كل على حدة إلى الصياغة الكاملة للنظرية، التى تشكل بلا أدنى شك واحدة من أكبر المفاهيم التى وضعها العقل الإنسانى.

تعتبر نظرية الكم هى الإطار الضرورى لفهم الطبيعة، من منتهى الصغر إلى منتهى الكبر. وتعتبر قوانين نظرية الكم هى القاعدة المهمة التى تبنى عليها

---

(٩٥)نص المحاضرة رقم ٢١٣ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٣١ يوليو ٢٠٠٠.

(٩٦)جمع كم (quantum).

فيزياء الجسيمات والذرة والجزيئات وعلم الكيمياء. وتنطبق النظرية نفسها على مجموعة الذرات التى تكون المادة الصلبة كالتوصيل الكهربى والمغناطيسية أو التوصيل الفائق لبعض المعادن عند درجات حرارة منخفضة. حتى الحياة، بسبب اعتمادها على الفيزيائية - الكيميائية على المستوى الجزيئى للـ DNA(٩٧)، تقع تحت طائلة قوانين الكم. وأخيرا، علم دراسة الأجرام، العلم الذى يلتصق بدراسة تطور الكون، يعطى أهمية كبرى للظواهر الكمية التى تتولد فى زمن الانفجار الأكبر.

وعلى الرغم من نجاحها المدوى، ينظر إلى فيزياء الكم على أنها غريبة الأطوار. لأنها تقدم فى الواقع عند شرحها للعالم مفاهيم عجيبة تناقص حدسنا الكلاسيكى. (يختص هذا بمبدأ تراكب الحالات الذى يشير إلى أن أى نظام فيزيائى من الممكن أن يكون معلقا بين واقع متعدد مختلف، أو مفهوم التشابك الكمى الذى يقدم لنا مبدأ مشوشًا لعدم التمركز فى الفيزياء. وتعود غرابتها إلى حد كبير إلى أننا لا نرى أبدًا آثارها على الأشياء العينية التى تحيط بنا، ومن ثم لا يستطيع عقلنا أن يفهمها. هذه الغرابة شوشت أفكار مؤسسى النظرية، وأصبح تفسيرها موضوع جدال ساخن بينهم. هذا الجدال حدث فى خلال المؤتمرات العلمية الشهيرة، فى وقت الشرح التفصيلى للنظرية واعتاد مرتادو هذه المؤتمرات أن يتصوروا تجارب تخيلية من خلالها يعزلون جسيمات معينة ويفرضون أن هذه الجسيمات تتبع القوانين الكمية ليتمكنوا من إثبات التناقضات الداخلية بالنظرية.

وانتهى هذا الجدال بانتصار نظرية الكم التى لم يستطع حتى آينشتين وشرودينجر (اللذين لعبا دور الادعاء الشرير) أن يهزماها. وتحولت أنظار الفيزيائيين عن هذا الجدل إلى البحث عن تجارب غير قابلة للتطبيق. كُرِّسَت لاستغلال النظرية لفهم الطبيعة واستخدامها بنجاح.

---

(٩٧) الحامض النووى DNA.

ومنذ بضعة أعوام، ومع التطور التكنولوجى تمكن الفيزيائيون من تحقيق نسخ سهلة من التجارب التى حلم بها مؤسسو نظرية الكم. نستطيع الآن أن نأسر فوتون، أو ذرات، أو جينات كل على حدة، والتحكم فيها فى حالة حركتها عن طريق أشعة الليزر، ومن ثم بناء أجسام غريبة، نسبيا مركبة، تتبع المنطق الكمى. ونستطيع بطريقة راسخة الآن ومن جديد دراسة مبادئ النظرية. ونستطيع بالتساوى أن نتصور تطبيقات مدهشة. وسوف نكرس هذا العرض للتجارب التى بدأت فى مخيلة العلماء وأصبحت حقيقة. إنه استكشاف سريع فى قلب العالم الكمى.

تراكب، تداخل كمى وتتامية[٩٨]

لنبدأ بمقدمة عن مبدأ التراكب (Superposition). تقول لنا نظرية الكم بطريقة معينة، إن كل الجسيمات المجهرية لها موهبة التواجد فى كل مكان. كلاسيكيا كانت الجسيمات لابد أن تتواجد فى نقطة محددة، أما كميا فمن الممكن تواجدها معلقة بداخل تراكب من الحالات المطابقة لكل المواقع الممكنة كلاسيكيا، لكل موقع من هذه المواقع عدد يسمى الدالة الموجية للجسيم فى نقطة معينة. قدم دوبروجلى de Broglieهذه الدالة وقام شرودينجر بوضع المعادلة التى تشرح تطورها، دراميا هكذا بدأت أساسيات قوانين الديناميكيا الكمية. والدالة الموجية عبارة عن عدد مركب فى معظم الأحيان. وكما أن الرقم الحقيقى يمكن تصوره كنقطة على خط مستقيم، يمثل الرقم المركب بمتجه فى مستوى وله سعة (طول المتجه) وطور (اتجاهه). وكان لماكس بورن Max Born الفضل فى التفسير الفيزيائى للدالة الموجية. ويمثل مربع السعة احتمال وجود الجسيم فى المكان المناسب عند إجراء قياس. وهكذا طبقا للنظرية فالغرابة الكمية والتراكب لا تتعايش إلا عندما لا نبحث عن معرفة موضع الجسيم. فإذا حاولنا البحث عن موقعه نفرض على الطبيعة أن تهجر غرابتها الكمية، ويظهر مكان الجسيم فى

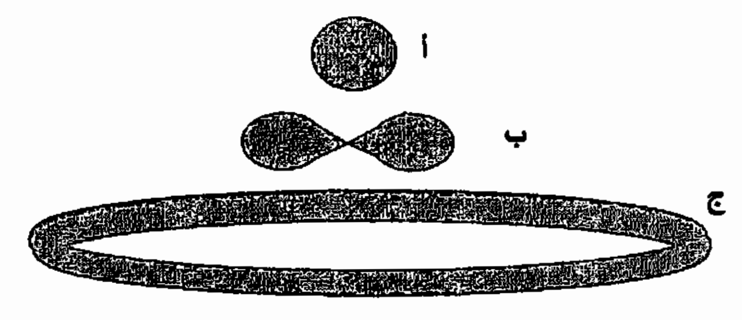
---

(٩٨) المفهوم الموجى للإلكترون مع مفهومه الجسيمى.

نقطة واحدة فقط. ولا يمكن رؤية هذا الظهور إلا إحصائيا، وليس بطريقة مطلقة كما في الفيزياء الكلاسيكية. وهذا ما دفع آينشتين إلى مقولته الشهيرة "الخالق لا يلعب بالنرد"، وهو ما كان يرفض الاعتراف به هو شخصيا.

وسمحت الفيزياء الذرية بتوضيح مفهوم أولي لمبدأ التراكب. يمثل الكيميائيون حالة الإلكترون في الذرة- مثلا أبسط واحدة فيها -الهيدروجين بحجم في الفضاء نسميه المدار كما في الرسم (١-أ). في الحالة الأساسية للهيدروجين يمثل هذا الحجم بكرة مركزها نواة الذرة التي لها قطر في حدود إنجستروم واحد.($Angström(10^{-10}m)$ إنه يصف المنطقة التي لا يتمركز فيها الإلكترون في الفضاء. إنه يتواجد في الواقع في تراكب لكل المواضع المحتملة لهذه الكرة.

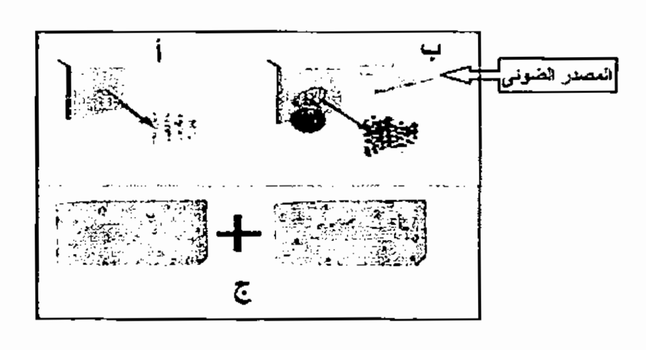
عندما نضع الإلكترون الذري في مستوى طاقة (المحدد بالمدار) مستثار عن طريق إعطائه طاقة ضوئية، يتغير شكل مداره، ويتمدد قليلا ليحتل مناطق أكثر بعدا عن النواة كما يظهر الرسم (أ -ب). الحالة البالغة الاستثارة من الذرة، تسمى حالات ريدبرج (Rydberg). في بعض هذه الحالات، يحتل الإلكترون مدارًا ممتدًا جدًا، مثل الإطار، ويكون نصف قطره ألف أنجستروم (الرسم أ - ج)، هذه الحالات المستثارة العملاقة لها صفات غاية في الأهمية سنتحدث عنها فيما بعد.



الشكل (١)

أشكال المدارات. (أ) أول حالة استثارة (ب) حالة ريدبرج للاستثارة الفائقة (ج) مدار إلكترون ذرة الهيدروجين. الرسم (ج) لا يتبع مقياس الرسم نفسه للحالتين السابقتين، لأن مدار ريدبرج يصل إلى قطر ألف مرة أكبر من الحالة الأرضية

وسنعمل الآن على شرح نتيجة (عاقبة) من نتائج مبدأ التراكب وهى وجـــود التداخل الكمى. لنشرح الآن الموضوع باستخدام فكـــرة تجربـــة يـــونج (Young) للتداخل الضوئى الذى ابتكرها فى بداية القرن التاســـع عـــشر باســـتخدام الـــضوء (الفوتونات) وطُوِّرت فى القرن العشرين باستخدام الإلكترونات وفيما بعد باستخدام الذرات والجزيئات: جسيمات تعبر حائل به ثقبان قبل أن تصل إلى حائـــل آخـــر، ونعثر على الجسيمات فى نقط دقيقة على الحائل، كما يظهر فى الرسم (٢-أ) وبعد أن سجلنا وصول عدد كبير من الجسيمات، ندرك أن نقط الالتقاء مع الحائل تشكل شبكة أهداب لامعة يفصلها أهداب سوداء لا يصل إليها الجسيمات أبدا. ويمكـــن أن نفهم التجربة كاملا باستخدام الدالة الموجية للجسيمات. وتحتوى هذه الدالـــة علـــى مركبين، يناسبان مرور الضوء فى كل من الثقبين. الدالة الموجبـــة الكاملـــة هـــى حاصل جمع المركبين، بمفهوم الجمع للأعداد المركبة. أو للمتجهات التى تمثلهـــا. فى بعض النقط على الحائل، تقع الموجات فى الطور نفسه، وتكون متجهاتها فـــى الاتجاه نفسه ويصبح لدينا احتمال فى العثور على الجسيم. وفى الـــنقط الأخـــرى، يصبح للموجبات أطوار متعارضة، ومن ثم يئول احتمال وصـــول الجـــسيم إلـــى صفر، ويختفى شكل التراكب عند إغلاق أحد الثقوب لأن أحـــد مركبـــات الدالـــة الموجية اختفى.



الشكل (٢)

التداخل الكمى: أ- تجربة يونج: كل جسيم يعبر الجهاز ويسلك طريقين ونقط سقوط الضوء على الحائل تشكل أهدابًا. ب- إذا أردنا تتبع الطريق الذى سلكه الجسيم نفقد التداخل (مبدأ التتامية).
ج- عندما نحاول أن نركب حالتين مختلفتين لنظام عينى (+ ترمز للتراكب) لحالة قطة حية وأخرى ميتة فى علبة، تتشابك البيئة المحيطة بداخل العلبة مع النظام بسرعة لتمحى آثار التداخل (عدم التماسك).

هذا التغير الموجى يصبح غريبًا إذا انتهينا إلى أنه من الممكن أداء التجربة حتى تحت ظروف تدفق (flux) ضعيف جدا، بحيث لا يتواجد فى أى حين إلا جسيم واحد فى الجهاز نحصل أيضا على الأهداب نفسها بعد زمن وصول طويل جدا ونتساءل عندئذ، كيف للجسيم الوحيد فى الجهاز أن يعرف أن هناك ثقبين مفتوحين أو كيف أنه لابد أن يتفادى الأهداب السوداء، وماذا سيفعل إذا كان هناك ثقب مغلق، فى هذه الحالة سيصل إلى أى مكان!

عندنا الآن مثل مثالى للمنطق غير الكلاسيكى: الظاهرة (وصول الجسيم إلى نقطة) تصبح أقل احتمالا إذا كان هناك إمكانيتان مسموح بهما للجسيم، عن إذا كان هناك إمكانية واحدة. فيزياء كلاسيكى سوف يسأل فى الحال سؤالاً بسيطًا: عن طريق أى ثقب يمر فعلا الجسيم؟ هل هذه موجة (فى هذه الحالة نرى التداخل وليس الوصول إلى الحائل)، أم هو جسيم (فى هذه الحالة نرى فقط الوصول إلى الحائل ولا نرى التراكب). وتعطينى الميكانيكا الكمية الإجابة فى أنه بفضل مبدأ

التراكب، يمر الجسيم فى الثقبين فى الوقت نفسه ببطء بحيث لا نجبرهما على الاختيار! ونبين فى النهاية أن التجارب تحقيقها يكون سهلا نسبيا باستخدام جسيمات مجهرية، ويصبح أكثر صعوبة مع الجسيمات ذات الأطوال الأكبر والتى يهمنا أكثر دراستها. هذه التجارب ممكنة مع الجزيئات ومستحيلة مع كرات البلياردو أو أى جسم عينى. يلعب التراكب الكمى دورا رئيسيا فى الفيزياء المجهرية. ومن الممكن الاستفادة منه فى تطبيقات مهمة، ولنأخذ فى الاعتبار مثلا ذرة لها مستويان من الطاقة، حالة أرضية g[٩٩] وحالة أخرى مستثارة e[١٠٠]. نعلم عندما تمتص الذرة ضوءا له تردد فإنها تنقل من الحالة g إلى e بطاقة تساوى هذه المعادلة $E_e-E_g = h\nu$ (حيث h هى ثابت بلانك)، فإذا استثرنا الذرة بنبضة ضوئية ونقوم بضبط ميقات هذه النبضة، فمن الممكن أن نجد الذرة مستثارة فى حالة تقع فى الوسط بين g, e أى فى حالة تراكب بين الحالتين. لنعرض الآن هذه الذرة لنبضتين متطابقتين، غير متزامنتين، فى الزمنين t_2,t_1. كل من النبضتين يُحدث تراكبا بين الحالتين g, e. ولنقس الآن الطاقة، ونقم بأداء التجربة مرات عديدة، حتى نحدد احتمال وجود الذرة فى الحالة e الدالة الموجية المصاحبة للذرة تقدم لنا حدين، أحدهما يصاحب الاستثارة من g إلى e فى الزمن t_1 والآخر فى الزمن t_2. ولهذه الحدود سعة مركبة تتراكب هى الأخرى. ومن الممكن تغيير ترددها النسبى عن طريق تغيير قيمة الذبذبة ν حول قيمة الذبذبة الرنينية للذرة ونحصل عندئذ على إشارة تراكب أسماء (de Ramsey) دى رامزى نسبة إلى العالم الذى ابتكر هذه الطريقة لقياس التداخل (Interferometer). ينتج التداخل فى تجربة يانج من أننا لا نعلم من أين مر الجسيم (من أى ثقب)، وهذا ينتج عن البلبلة فى معرفة زمن الإثارة للذرة. وعن طريق هذه الفكرة، تعمل الساعة الذرية على تتبع أهداف التداخل لذرة السيزيوم. ولنرجع الآن إلى السؤال الذى طرحناه، أى طريق سلكه الجسيم؟ لا يرى التراكب إلا إذا لم يكن لدينا أى وسيلة لمعرفة الطريق الذى سلكه

---

(٩٩)مستثار (excited) e أكتسب طاقة فوق المستوى الأرضى.

(١٠٠)(ground) g أى أنه لم يستثار من حالته الأصلية حالة أرضية.

الضوء. وإذا أردنا أن نعرفه فلابد أن نقدم وسيلة لقياسه بالأجهزة المعملية، مثل إضافة مصدر ضوئى، كالليزر لإضاءة الثقوب (الرسم ٢ ب).

عندما يمر الجسيم فإنه يبث ضوءًا فى جواره، والإنارة التى يُحدثها يمكن تتبعها لمعرفة مسار الجسيم. ندرك أن الجسيم يمر عشوائيا فى أحد الثقوب، وأن الأهداف تختفى وتصبح نقاط الالتقاء مع الحائل موزعة بانتظام. ويمكن القول إنه عندما يبث الجسيم الضوء الذى يبين مساره يصاب بالاضطراب بحيث تتشوش العلاقات التى تصف الطور المصاحب للدالة الموجية لكليهما، مما يؤدى إلى اختفاء الأهداب. هذه النتيجة تعبر عما لقبه بوهر (Bohr) بمبدأ التتامية (المكمل). تواجد الأهداف أو معرفة الطريق المتبع للجسيم هما مبدآن مستبعد كلاهما للآخر ومتمم للحقيقة الفيزيائية. وتتطلب دراستهما جهازين مختلفين. فالآن لابد لنا أن نكون دقيقين عند دراسة الخواص الموجبة للجسيم، فنستخدم جهازًا لا يميز بين الطرق عند دراسة الخواص المادية للجسيم وآخر يسمح بتمييز الطرق لدراسة الخواص الموجية.

التشابك الكمى
قطة شرودينجر وعدم الترابط

ولنرجع الآن إلى نتيجة أساسية لمبدأ التراكب، ويمكن مشاهدته فى النظم المكونة على الأقل من جسيمين يتفاعلان معًا ثم ينفصلان. لكى نرتب أفكارنا، لنبدأ بدراسة تصادم اثنتين من الذرات المتشابهة 1 و2، كلتاهما تملك مستويين من الطاقة e , g. ولنتخيل أنه قبل التصادم، كانت الذرة 1 فى حالة استثارة e بينما الذرة 2 فى الحالة الأرضية. وفى خلال التصادم يمكن حدوث حالتين مختلفتين. سوف يحدث أحد الاحتمالين: تحتفظ الذرات بطاقاتها الأولية أو ستتبادلها. كلاسيكيا لابد أن تختار الذرات واحدًا من الاحتمالين. أما القاعدة الكمية فمختلفة. يمكن أن يسلكا الطريقين فى الوقت نفسه. فالنظام بعد التصادم أصبح فى حالة تراكب ناتجة

من كلتا الحالتين: حالة الذرة **1** فى **e** والــذرة **2** فــى **g** أو **1** فــى **g** و**2** فــى **e**. يصاحب كلاً من هذه الحالات سعة مُركَّبة. ويُمثل مربع هــذه الــسعات، احتمــال وجود أى من هاتين الحالتين عند إجراء قياس على إحدى الذرتين. فإذا كانت نتيجة القياس على كل ذرة عشوائية تصبح العلاقات المتبادلة بين نتائج هــذه القياســات مؤكدة. إذا وجدت الذرة **1** فى **e** وتصبح الذرة **2** فى **g** والعكــس صــحيح. هــذه العلاقة التبادلية الرائعة، التى يمكن مشاهدتها أيًا كــان القيــاس المجهــرى علــى الذرتين، تسمى التشابك الكمى (**entanglement**). هذا التشابك يظل حتــى بعــد تباعد الذرتين بمسافة تقديريا كبيرة. إنها تصف مبدأ "اللاتمركز" فى فيزياء الكــم. فالقياس الذى تقوم به على الذرة **1** يمكن أن يتسبب فى الحال بالتأثير عن بعد على القياسات التى نقوم بها على الذرة **2**. لقد كان آينشتين وزملاؤه بودولــسكى ورزن أول من تكلموا عن هذه الظاهرة المزعجة بالنظرية فى سنة ١٩٣٥ التى نــسميها منذ ذلك الوقت مشكلة **EPR**. بالنسبة لأينشتين، فهذا ينــدرج علــى خطــأ فــادح بالنظرية؛ لأنها تتوقع آثارًا غريبة كما كان يظن. ومنذ ذلك الحين، أعيد النظر فى هذه المشكلة عن طريق عدة فيزيائيين أشهرهم جون بل (**John Bell**) فى الستينات من القرن الماضى. وعن طريق عدة تجارب على الفوتونات المتــشابكة أثبــت أن الطبيعة تتصرف بالضبط كما تصفها لنا نظرية الكم. وكانت أكثر هــذه التجــارب تأكيدا هى التجربة التى أداها آلان آسبيكت (**Alain Aspect**) وزملاؤه فى أورسى (**Orsay**). ونؤكد أن مبدأ اللاتمركز الذى تم التأكد منه عن طريق هذه التجارب لا يتعارض مع مبدأ السببية. لا نستطيع أن تستخدم هذه العلاقات التبادلية **EPR** لبــث معلومات فى الحال بين نقطتين.

وإذا بدا لنا أن مبدأ التشابك غريب، فهذا يرجع إلى أنه مثل التداخل الكمــى، لا يمكن رؤيته على أشياء عينية. وهذا يعود بنا إلى استعارة مشهودة تلقب بقطــة شرودنجر. لنفكر فى مشكلة **EPR**، ولكن شرودينجر ذهب بالفعل إلى أبعــد مــن هذا. تساءل: ما الذى يمنع تضخيم ظاهرة التشابك الكمى المجهرية من شرح نظام عينى؟ لندرس حالة ذرة مستثارة، تبث فوتونًا ثم تفقد الاستثارة. وتعلمنا ميكانيكــا

الكم أنه قبل أن يبث الفوتون بطريقة مؤكدة، تواجد النظام فى حالة تراكب بين حالة الاستثارة وحالة عدم الاستثارة. كل حد يتأثر بسعته المعقدة فى التعبير الشامل عن النظام. ولكن شرودينجر يلاحظ أن فوتونًا واحدًا من الممكن أن يؤجج حدثًا عينيًا. لنتخيل أن ذرة ما أغلقت عليها علبة مع قطة. ولنتخيل أن الفوتون الذى بثته الذرة يؤدى إلى انبعاث غاز يقتل القطة. فإذا كانت الذرة فى حالة تراكب بين الحالة التى لم يبث فيها الفوتون بعد والحالة التى بث فيها الفوتون، فماذا يكون حال القطة؟ فإذا اعترفنا أن القطة من الممكن أن نصف حالها كميا (ونلمس الآن، كما سنشرح فيما بعد، مفهومًا مهمًّا عن المشكلة)، نستطيع أن نستنتج أن هناك تشابكًا بين نظام الذرة + القطة، الذى ينبغى أن يتواجد فى حالة تراكب بين حالة القطة الحية المصاحبة للذرة المستثارة وحالة القطة الميتة المصاحبة للذرة غير المستثارة. هذه الحالة المضحكة فى نظر شرودنجر تترك القطة المسكينة معلقة بين حالتى الحياة والموت كما فى الصورة (٢-ج)، هذه المشكلة تلتها كتابات كثيرة. البعض يقول، إنه فى الوقت الذى نبحث فيه إذا كانت القطة حية أو ميتة تظهر وسيلة عقلية (قوة) عند المشاهد يجبر بها الطبيعة على تقرير ما سيحدث. وآخرون تساءلوا عن إمكانية إعطاء القطة نفسها هذه الوسيلة العقلية وهكذا تدخل المناقشة فى مجال ما وراء الطبيعة (ميتافيزيقا).

فإذا أردنا تفادى هذا الجدال، علينا باستخدام طريقة بوهر. إذا أردنا أن نتأكد من وجود تراكب الحالات، فلابد أن نتخيل جهازًا محددًا للقياس. ولا نستطيع أن نثبت حالة تراكب "القطة الحية - القطة الميتة" إلا عن طريق عمل تجربة قادرة على رؤية التداخل بين سعة الدوال المصاحبة لحالة "الحياة" و"الموت" للقطة. لم يتحدث شرودنجر عن الموضوع أبعد من ذلك، ولكننا نحلم مثلا بقياس حالة القطة عن طريق إدخال فأر كمى إلى العلبة. واحتمال فرار الفأر من العلبة عبارة عن مربع مجموع السعات المصاحبة لحالة القطة الحية ولحالة القطة الميتة. هل سنرى فى النهاية بداخل الاحتمال الناتج حدًا للتداخل؟ إنه قليل الاحتمال ويعارض بقوة حدسنا.

السؤال الذى نطرحه سيكون: ماذا حدث للتداخل، وأين اختفى التداخل؟ الإجابة تُدخل مفهوم اللاتماسك فى النقاش. الحالة التى قمنا بشرحها تفصيليا لها أهملت عاملاً أساسيًا. القطة لا تستطيع أن تتواجد مع ذرة واحدة "تُقرر" مصيرها. القطة – مثلها مثل كل النظم العينية – تسبح فى بيئة مليئة بالعديد من الجزيئات والفوتونات الحرارية وتَقارُن هذه الأشياء مع البيئة لا يمكن أبدا إهماله. لنفهم جيدا ما يحدث علينا أن نرجع أولا إلى تجربة يونج (**Young**). إذا أردنا أن نبحث عن الطريق الذى سلكه الجسيم لابد أن نبث له فوتونًا (الصورة ٢-ب) ونشابك هذا الفوتون مع الذرة ونحصل على زوج **EPR** مكون من عاملين، الفوتون والذرة. إذا قمنا بقياس حالة الفوتون، علمنا أن الجسيم مر بأحد الثقوب. والحالة الأخرى إذا اختفت. لم يعد هناك تداخل، وهكذا نفهم التتامية (الإكمال) **Complementarity** بطريقة أفضل، كأنها أثر تشابك الجسيم مع البيئة المحيطة (فى هذه الحالة الفوتون) التى تتفاعل تبادليا معها. حالة قطتنا شبيهة بذلك. ولننظر جيدا إلى نقطة انطلاق تفكيرنا، لابد أن نتساءل عن صحة وجود القطة فى حالة كمية محددة جيدًا منذ أول وهلة فى التجربة. منذ الوهلة الأولى، تشابكت القطة مع البيئة المحيطة بها ولا يمكن وصفها بحالة كمية تخصها وحدها. وحتى إذا اعترفنا بإمكانية فصلها عن العالم من أول وهلة، لن نستطيع أن نمنع تفاعلها مع البيئة المحيطة بها لحظة تفاعلها مع الذرة الوحيدة التى تخيلها شرودنجر. عند وضعها فى حالة تراكب، سوف تتفاعل أيضا مع فيض من الجزيئات والفوتونات التى سرعان ما ستدخل فى حالات كمية مختلفة تبعا لحالة حياة أو موت القط. بسرعة جدًا، سوف يتسرب نبأ حالة القطة إلى البيئة المحيطة، مدمرا بذلك التداخل الكمى بنفس طريقة الفوتون الذى تم بثه فى تجربة يونج فتسبب فى اختفاء الأهداب.

ولنعلم أن اللاتماسك يتولد بطريقة أسرع عندما يزداد قياس النظم. وهذا يرجع إلى أنه كلما كبر النظام اقترن بعدد أكبر من درجات الحرية فى البيئة المحيطة به. وليس ضروريًا أن ندرس نظم عينية مثل القطة لندرك أن عدم التماسك يسيطر على الأمور. إنها تصلح أكثر فى اتجاه الحالة المجهرية للبيولوجيا

عن حالة الجزيئات العينية والفيروسات أو الباكتيريا. وحقيقة أننا استخدمنا كائنات حية للتوضيح هنا ليس إلا لدواعى الشرح. ويصبح عدم التماسك مهما جدا فى شرح الأجسام الخاملة المكونة من عدد كبير من الجسيمات (مجموعة ذرات، حبات الأتربة...) وصورة القطة ليست إلا مجازا حادا تخيله شرودينجر ليثير العقول.

ذرات وفوتونات فى علبة

لندخل الآن فى شرح بضع تجارب حديثة عن التشابك الكمى، وهى تطبيق رائع للتجارب التى بدأت بأفكاره. ويوجد مبدئيا ثلاثة نظم بنيت عليها أجهزة معقدة لقياس التشابك.

تقدمت صناعة مصادر الفوتونات المتشابكة بوضوح منذ تجارب أسبيكت (Aspect). ونحصل الآن على أزواج من الفوتونات المتشابكة عن طريق تحليل فوتون فوق بنفسجى بداخل بلورة لاخطية إلى اثنين من الفوتونات المرئية أو تحت الحمراء. وتجارب جميلة تم عملها حديثا فى إنسبروك **Innsbruck** وفى جينيف والولايات المتحدة.

فى بعض الأحيان، يفضل استخدام جسيمات كبيرة الكتلة، تستمر مدة طويلة فى أجهزة القياس حتى نستطيع دراستها بدلا من الفوتونات التى تهرب من النظام بسرعة الضوء. ونستطيع أن نستخدم أيضا أيونات تم اصطيادها فى حقل كهرومغناطيسى. كل ما علينا هو أن نزيل إلكترونًا واحدًا من الذرات حتى تحصل هذه الذرات على شحنة تمكننا من التحكم فيها كهربيا عن طريق الإلكترونات (أقطاب) الكهربية الموظفة جيدا. ومن ثم نستطيع أن نأسر الأيونات ونراها من خلال الضوء الفلورى الذى تبثه عند تعرضها لشعاع الليزر. وتجارب جميلة أيضا على التشابك تم إجراؤها فى بولدر بكولورادو (Bolder, colorado).



الشكل (٣)

تجربة لتحضيرزوج من الذرات المتداخلة، الأول له حالة g والثانى فى الحالة e يرسلان بداخل فجوة فارغة قبل بدء التجربة

والنوعية الثالثة من التجارب أجريت بجامعة فرنسية (école normal supérieure) بباريس، وتتصف بالوسطية بين التجربتين. فتقوم بتشابك كل من الفوتونات والذرات فى الوقت نفسه. ولا تنتشر الفوتونات ولكنها تحاصر فى فجوة كهرومغناطيسية تمر بها الذرات. الفجوة مكونة من مرايا معدنية من مادة النيوبيوم[١٠١] الفائقة التوصيل عند درجات حرارة منخفضة جدا، وموضوعة وجها لوجه. ومن الممكن أن تنعكس فوتونات الموجة المتوسطة منها مئات الملايين من المرات وتبقى محاصرة لمدة زمنية بمقدار ميلليثانية. والذرات التى يتم تحضيرها فى حالة ريدبرج البالغة الاستثارة تمر بداخل الفجوة وتتفاعل مع الفوتونات وتتأين ويتم تتبعها. وحجم الذرات الكبير (الرسم ١-ج) يجعلها غاية فى الحساسية للاقتران بالأشعة بداخل الفجوة. وهذا شرط أساسى لمشاهدة ظواهر التشابك الكمى.

سوف نعطى نظرة عامة على بعض التجارب التى أجريت حديثا على تشابك الذرة الفجوة (Atome-cavite). وحتى نسهل الأمور لنقر بأن الذرات لها أوليا مستويان ريدبرج نسميهما g ، e (كما سبق)، ونضبط الفواصل بين المرايا فى أول الأمر بحيث تكون فوتونات الفجوة فى حالة رنين عند الانتقال بين هذين المستويين، هذا يعنى أنه إذا دخلت الذرة فى المستوى e، من الممكن (مع اتباع

(١٠١) Niobium 101 مادة تقع فى المجموعة الخامسة ويرمز له Nb.

مبدأ بقاء الطاقة) أن تبث فوتونا وتصبح فى المستوى g ومن الممكن أيضا أن تدخل الذرة فى الحالة g وتمتص فوتونا لتنقل إلى الحالة e. قبل أن نبدأ التجربة لنبعث ذرة فى الحالة e ونضبط الوقت اللازم لقطع الفجوة الخالية بحيث يكون احتمال بث الفوتون 50%. والحالة النهائية التى نحصل عليها عبارة عن تراكب ذرة فى الحالة e مع فجوة خالية وذرة فى الحالة g مع فجوة تحتوى على فوتون مما يشكل تشابكا فوتونى–ذرى. ويبقى هذا التشابك بعد خروج الذرة من الفجوة.

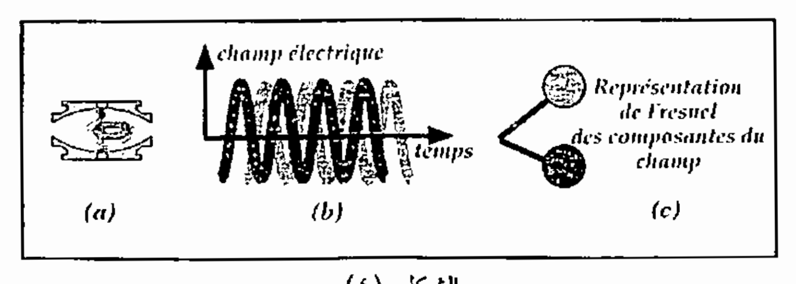
ولنعقد المسألة أكثر الآن عن طريق إدخال ذرتين للفجوة واحدة فى الحالة e والأخرى فى الحالة g. الذرة الأولى تدخل بسرعتها المضبوطة لبث الفوتون باحتمال ٥٠% والذرة الثانية تتفاعل فى المدة الزمنية اللازمة لامتصاص فوتون إن وجد، إننا نتكلم إذن عن انتقال الطاقة بين الذرتين بالتأثير الحثى للفجوة. فإذا تساءلنا بعد مرور الذرتين إذا كانت الاستثارة انتقلت من ذرة إلى أخرى، ترد علينا نظرية ردا عجيبا: نعم ولا فى آن واحد. النتيجة زوج من الذرات المتشابكة والصورة التوضيحية فى الرسم ٣ من الممكن تعميمه على عدد أكبر من الجسيمات. من الممكن أن نتصور حالات لذرتين وفوتون أو حتى ثلاث ذرات متشابكة.

النسخة المعملية لقطة شرودنجر

لنتصور الآن حالة تكون فيها الفجوة فى حالة لا تتفق مع تردد الانتقال الذرى. حينئذ يتسبب مبدأ عدم بقاء الطاقة بمنع بث الذرة أو امتصاصها للفوتون، ولكن هذا لا يعنى أن النظامين لا يتفاعلان. فوجود الذرة بداخل الفجوة يعدل قليلا تذبذب المجال الذى تحتويه الفجوة. وهذا الأثر يعتمد على حالة الطاقة الخاصة بالذرة. وطبقا لمستوى طاقة الذرة تزداد الذبذبة أو تتناقص. وماذا يحدث إذا كانت الذرة فى حالة تراكب بين الحالتين؟ تقول القوانين الكمية بأننا لابد أن نحصل "فى الوقت نفسه" على ذبذبة مستنقصة ومستزادة. هذا الرد العجيب يسوقنا إلى إمكانية تخليق نوع جديد من التشابك.

لنبدأ بحقن ما بين المرايا بمجال يحتوى على بعض الفوتونات عن طريــق مصدر موجى - ميكروى (موجات صغرية) يقترن بالفجوة من خلال دليل موجى ثم نفصل هذا المصدر.

وهكذا نستطيع أن نحاصر بضعة فوتونات فى الفجــوة لمــدة كــسر مــن الميليثانية، ويمثل المجال الكهربائى للموجة المصاحبة لها بدالة دورية فى الــزمن. ونستطيع أن نمثل هذه الدالة بعدد مركب، معــاملاً تحويلــه (Module) وطــوره يمثلان بنظيريهما فى هذا العدد المركب الذى يمثل بدوره متجهًا (نجد أن التمثيــل بالأعداد المركبة مبدأ استخدمه فرنل (Fresnel) فى البصريات، نهاية المتجه تقــع بداخل دائرة صغيرة لعدم التأكد، هذه الدائرة تعكس وجود تذبذبات كمية لسعة هــذه المجالات وطورها.



الشكل (٤)

كيفية تحضير حالة القطة في مجال بداخل فجوة

أ- ذرة فى تراكب حالتين تمر فى الفجوة

ب- يصبح للمجال طوران فى وقت واحد

ج- كل مركب للطور ممثل بمتجه يشير إلى اتجاه معين

ولنرسل مرة ثانية ذرتنا إلى (داخل الفجوة حيث يوجد تراكب الحالتين e وg كما فى الرسم (٤-١). ووجودها يؤدى بطريقة انتقالية إلى تغييــر دورة تذبــذبات المجال ويتغير طورها أى تحريك زمن حدوثها بالنهايــات العظمــى والنهايــات الصغرى الخاصة به (الرسم ٤- ب). وبطريقة مكافئة يدور المتجه الممثل للمجال

في مستوى الأطوار. ولأن الذرة فى تراكب بين حالتين ينتج عن ذلك ظواهر لهـا إشارات مختلفة من ثم يصبح عندنا حالتان بطورين مختلفين متشابكين مع الحالتين الذرتين. هذا الموقف يذكرنا بقطة شرودنجر (الرسم ٤ ج). ونلاحـظ أن المجـال عبارة عن مؤشر قياس مصوب تجاه اتجاهين مختلفين لمستوى فرنـل (Fresnel) تبعا لحالة الذرة e أو g كما لو كان جهازًا معياريًا لمشاهدة الذرة.

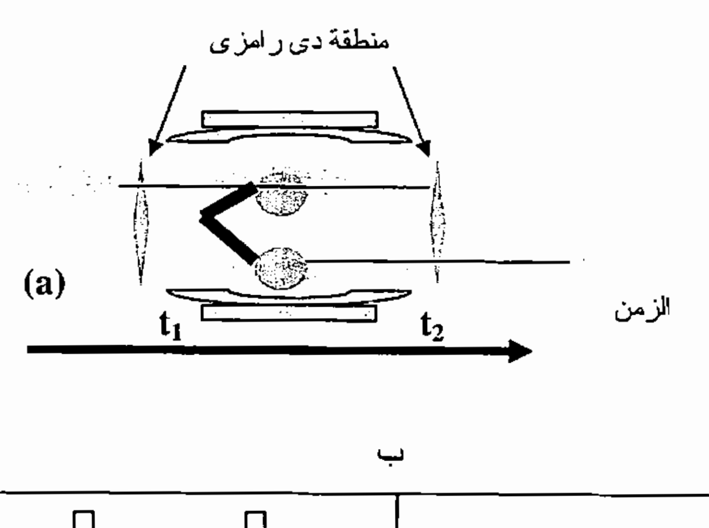
هذه الملاحظة تقودنا إلى شرح تجربة لتوضيح مبدأ التتامية عندما نعـرض الذرات إلى ومضات ضوئية تخلط الحالات e و g فى الأزمنة t_2 ، t_1 (عن طريـق تعريض الذرة إلى ومضات فى "منطقة رامزى" (Ramsey) المحددة بأسـهم فـى الرسم (٥- أ) نحصل على إشارة لأهداب التداخل مع احتمال نهائى لوجود الـذرة فى g. هذه الأهداب لا ترى إلا إذا مكننا الجهاز من معرفة فى أى حالـة تتواجـد الذرة بين الومضتين. ولنعرض الذرة بين الزمن t_1 والزمن t_2 إلـى مجـال غيـر رنينى صغير موضوع بداخل فجوة، يدور طور هذا المجال بزاوية تعتمـد علـى حالة الذرة. يتجسس المجال على النواة ومن ثم تختفى الأهداب. وهـذا هـو مـا نشاهده فى الرسم (٥- ب). فإذا كان دوران طول المجال ضـعيفًا لا نـستطيع أن نستنتج الحالة الذرية بيقين ومن ثم تبقى الأهداب مع تباين ضئيل. وتختفى الأهداب تماما عند الدوران بقيمة كبيرة، وتصبح المعلومات متوفرة ومؤكدة عـن طريـق الذرة. نعدل فى دوران طور المجال عن طريق تغيير عدم التوافـق بـين الـذرة والفجوة - الذبذبة.

القبض على عدم الترابط الكمى متلبسا

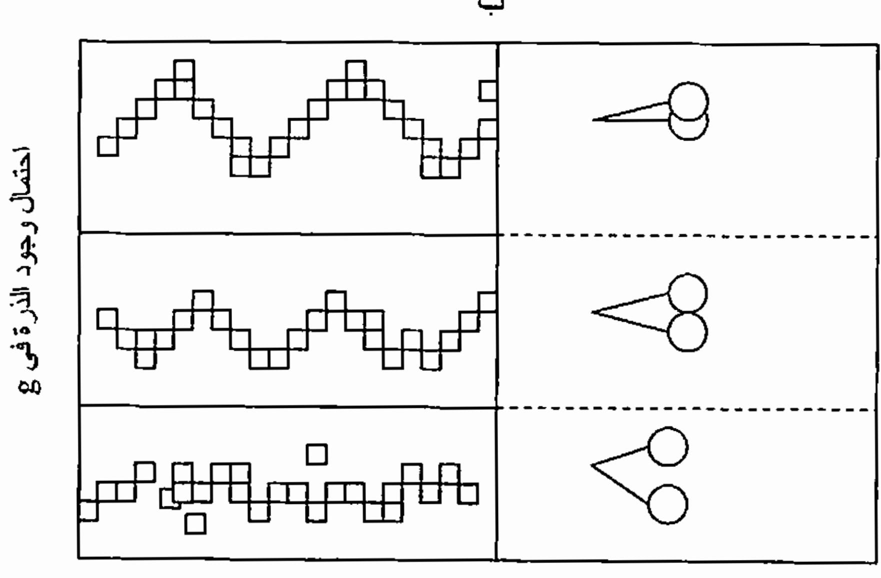
التجربة التى شرحناها تخص تراكب حالات الذرة التى تأثرت بوجود مجال ماذا نقول عن تراكب حالات المجال نفسه؟ وإلى متى تستمر حالات التراكب؟ بيئة المجال تتكون من الفضاء الذى يحيط بالفجوة، والذى من الممكن ملؤه بالفوتونـات المنبثة عن طريق العيوب الموجودة بسطح المرايا. فى الواقع وجود آلية البث يحد

من طول حياة المجال إلى زمن T_{cav} عبارة عن كسر من المليثانية. فــإذا كانــت الفجوة تحتوى على متوسط عدد فوتونات n فهناك مجال صـــغير يحتــوى علـــى فوتون يهرب إلى البيئة المحيطة فى زمن قصير جدا T_{cav} مقسوم على n.

هذا المجال المجهرى يعطينا معلومة عن طور المجال المتبقى فى الفجــوة. وهكذا بمقدار من T_{cav}/n، يختفى الترابط الكمى بين مركبات المجال بداخل الفجوة.



ب



الشكل (٥)

تجربة التتامية

أ- تسلك الذرة طريقين بين منطقة رامزى وطور المجال بداخل الفجوة

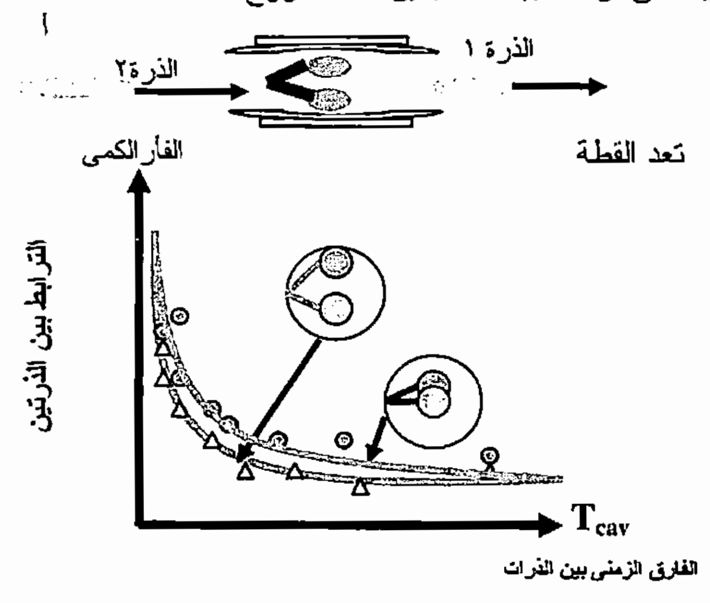
ب - إشارة: احتمالات رصد الذرة فى المستوى g مسجلة بدلالة التردد المؤثر على منطقة رامزى ثلاث قيم لتغير أطوار المجال.

وهذا يشرح لماذا المجالات العينية التى تحتوى على عدد كبير من n (في حدود مليون أو أكثر)، تتصرف كلاسيكيا، ويصبح عدم الترابط شبه لحظي. وفي تجربتنا تتراوح حول ١٠. إذن يصبح زمن عدم الترابط طويلاً بقدر يسمح بالمشاهدة الانتقالية للتداخل الكمي المصاحب لمركبي "حالة قطة شرودنجر". وحتى تتحقق هذه المشاهدة نبعث بداخل الفجوة بعد الذرة الأولى التى تحضر حالة القطة، ثم نليه بذرة أخرى تعمل كالفأر الكمي. هذه الذرة توجد مركبات المجال التي فرقتها الذرة الأولى بطريقة تجعله يظهر في صورة إشارة للعلاقة المتبادلة بين النتائج تتبع الذرتين. وهو حد مصاحب لمركبي حالة القطة ولدقة الذرة الأولى. وتقل إشارة التداخل (الرسم ٦) عندما يزداد الفارق الزمني بين دخول الذرتين، وتحدث هذه الظاهرة بسرعة كبيرة كلما زاد انفصال مركبي حالة القطة، مما يبين واحدًا من الأوجه الأساسية لمفهوم عدم الترابط، الذى يعمل أسرع كلما كان النظام عينيًا، هذه التجربة تمثل استكشافًا للحدود بين العوالم الكمية (التى تظهر بها آثار التداخل) والكلاسيكية (التى تحتجب فيها هذه الآثار).

نحو استخدام عملي للمنطق الكمي

خارج عن نطاق أهميتها الأساسية، ما الإضافات العملية لهذه التجارب والأخرى المجزأة على الأيونات المحتجزة أو الفوتونات المتشابكة؟ المنطق يحدثنا أنها تهيئ لنا إطارًا لتطور فرع من فروع مجال المعلومات يهتم بالطريقة التي نستطيع بها بث المعلومات والتحكم فيها عن طريق استغلال القوانين الكمية. ولنرجع إلى استخدام النظم ذات الحالتين مثل التى استخدمناها من قبل (ذرة لها مستويان: فجوة مع ٠ أو ١ فوتون) ومجال يقدم طورين ممكنين هذه النظم تعمل كحاملي المعلومات (البيتس bits) التى عن طريقها نستطيع برمجة قيمتين ٠ و/ أو ١. ويمكن اعتبار تجاربنا على أنها عمليات على هذه البيتس. هذه العمليات نقرنها ببعضها البعض طبقا لدنياميكية مشروطة.

نستطيع مثلا اعتبار أن المجال (٠ أو ١ فوتون) عبارة عن بيت (bit) "تحكم" وإن الذرة هي بيت (bit) "هدف". وهكذا نستطيع تصور التجربة بداخل الفجوة كما يلي: إذا كانت بيت "التحكم" في الحالة "٠" بيت "الهدف" لا يتغير لكنه يغير حالته إذا أصبح البيت (bit) التحكم في الحالة "١". ونحصل إذن على بوابة شرطية تشابه البوابات المستخدمة في الحاسوب الكلاسيكي. والجديد في هذه البوابة بالمقارنة بالموجودة في الحاسوب المعتاد. هو أن البيتس (bits) يمكن أن تتواجد في حالات تراكب. ونتحكم ها هنا ليس فقط في القيم ٠ أو ١ ولكن أيضا في حالات تراكب هذه القيم. نتحدث إذن عما نسميه الكيوبيت أو البيت الكمي (qubits). فإذا حضرنا كيوبيت " التحكم " في حالة تراكب بين ٠ أو ١ تعمل البوابة الشرطية على تولد ٢ بيت متشابكين عند الخروج.



الشكل (٦)

تجربة عدم الترابط Decoherence

١ـ الذرة تعد التراكب بين حالات مختلفة الطور للمجال بداخل الفجوة والذرة الثانية إشارات الترابط بين الذرتين كدالة في التأخير فيما بينها.

هذا التشابك الأولى من الممكن تكبيره عن طريق استخدام مخرج بوابة كمدخل بوابة على شكل مجموعة تتابعية (بنية شلالية) وهكذا دواليك.

وبهذه الطريقة نستطيع بناء توليفات معقدة من العمليات. هذا التشابك سيسمح لنا مبدئيا بالحصول على حالات مكافئة للتراكب المرتبط بين عدد كبير من الحاسبات الكلاسيكية تعمل على التوازى وتتداخل فيما بينها، فمثلا بعض أنواع الحسابات التى تتطلب (أزمنة) طويلة لتحليل الأعداد الكبيرة إلى حاصل ضرب أعداد أخرى (Factorization)، سيمكننا هذا من إتمام الحسابات بسرعة لا تسمح بها الألجوريتمات (algorithms) التقليدية، هذا التحليل يشرح لنا بقدر كبير الحاجة لهذا النوع من البحث العلمى. ومع ذلك لابد لنا أن نتحفظ على بعض الأمور. فمثلا عدم الترابط يمثل مشكلة غاية فى الأهمية لهذا النظام.

إن ما نسعى إلى بنائه ليس إلا قطة شرودينجر المهولة، تلك التى رأينا حساسيتها الفائقة للتقارن مع البيئة المحيطة. بمجرد أن يهرب كم (quantum) من الحاسوب يفقد تماما الترابط الكمى. البعض يتمنى حل هذه المشكلة عن طريق إدخال آليات لتصحيح الأخطاء الكمية. إن هذا يتطلب وجود أجهزة معقدة مازال وجودها بعيدًا عن المنال.

ويبقى مستقبل الحاسوب الكمى مع التلطف فى القول غير مؤكد. والتطبيقات الأخرى للمنطق الكمى التى لها حساسية أقل تجاه عدم الترابط، والشراكة بين مشاهدين لزوجين من الجسيمات المتشابكة يفتح الطرق أمام التشفير الكمى الذى بدوره يسمح بتبادل المعلومات السرية بطريقة لا يمكن تقصيها. تم تحقيق تجارب مشجعة جدا فى هذا المجال، فالانتقال الكمى عن بعد (Teleportation) يسمح بإنتاج الحالة الكمية لجسيم - عن بعد. عن طريق استخدام خواص التشابك. هذا الأثر يمكن أيضا استخدامه فى الأجهزة التى تتعامل مع المعلومات الكمية.

الخلاصة: المجد والخزى لنظرية الكم

من خلال هذا الاستكشاف الموجز للفيزياء الكمية سنتمم الحديث بمقولة الفيزيائى أرشيبالد ويلر-(Archibald Wheeler)- آخر الباقين على الحياة من جيل مؤسسى النظرية. ولنفكر فى دور نظريات الكم، لقد تحدث بطريقة حادة عن كل من المجد والخزى لنظرية الكم.

المجد أنه بالطبع لهذا النجاح الباهر فى شرح الطبيعة. والخزى فى أننا لا نفهم النظرية فى الصميم.

لأننا بسبب محاولتنا استخدام ألفاظ أخرجها عالمنا التقليدى نتوصل إلى تفسيرات مشوشة. وفى الواقع لا يقع الكثير من الفيزيائيين فى هذه المشكلة. فالطبيعة كما هى لابد أن تكون بلا جدال كمية دون "روح"، وأنها تطيع أوامر بوهر وآينشتين التى قالت: "توقفوا عن أمر الخالق بما ينبغى أن يفعله"! وبالنسبة للآخرين ينقصنا صياغة نظرية تؤهلنا لرؤية العالم كما هو. وكان الجديد فى نهاية القرن الماضى هو تحول هذه المشكلة التى ظلت أمدا مخصصة لعلماء الفيزياء النظرية و"أصحاب الخيال" على أنها تجارب فكرية إلى موضوع مفتوح للتجارب الواقعية فى الوقت الحالى.

تحقيق هذه التجارب الفكرية يشكل تحديًا مسليًا ومثيرًا. إنه هوى نادر فى المقدرة على تتبع رقصة الفوتونات والذرات التى تطيع بطريقة تامة أوامر نظرية الكم مباشرة "على الهواء".

ولابد أن ندرك أن هذه التجارب تصبح أكثر صعوبة عندما نزيد من حجم النظام. والحفاظ على نموذج مختزل لقطة شرودينجر المعلقة فى تراكب حالتين مترابطتين سيكون حقا شيئا صعبا. حتى لو كان الحاسوب الكمى بعيد المنال، ولكن هذا المجال البحثى يحتفظ لنا بمفاجآت. سيكون هناك بلا شك تطبيقات على هذه الفيزياء ولن يكون من السهل توقعها كما هو الحال دائما.

المراجع:

Sur l'intrication quantique et la décohérence :
– ZUREK (W.), « Decoherence and the Transition from Quantum to Classical », *Physics Today*, Vol. 44, n° 10, 1991, p. 36.

Sur les expériences d'atomes en cavité :
– BERMAN (P. R.), (éditeur), « Cavity Quantum Electrodynamics », *Academic Press*, Boston (1994).
– HAROCHE (S.), RAIMOND (J. M.) et BRUNE (M.), « Le chat de Schrödinger se prête à l'expérience », *La Recherche*, 301, Septembre 1997, p. 50.

Sur l'information quantique :
– BOUWMEESTER (D.), EKERT (A.) et ZEILINGER (A.) (éditeurs), « The physics of quantum information », *Springer Verlag*, Berlin, Heidelberg, 2000.

بعض الاختبارات المعملية لأساسيات ميكانيكا الكم
(فى علم البصريات)[١٠٢]

بقلم: آلان آسبيكت

Alain ASPECT

ترجمة د. هدى أبو شادى

سوف أحدثكم عن أساسيات علم ميكانيكا الكم والتجارب المعملية المباشرة عليها. لقد تطورت نظرية ميكانيكا الكم فى بداية القرن العشرين بين عامى ١٩٠٠ و١٩٢٥. وحققت هذه النظرية نجاحات فى فهم العالم الفيزيائى الذى يحيط بنا، وعن بناء الذرة فى أثناء التوصيل الكهربى للمواد الصلبة. لا يمكن شرح كل هذه الخواص إلا فى إطار ميكانيكا الكم. وكذلك تشرح ميكانيكا الكم التفاعلات التبادلية بين الضوء والمادة، مثلا كشرح كيفية بث المادة التى تم تسخينها ضوءًا أبيض (وهذا ما يحدث فى مصابيح الإنارة العادية). وعملية الابتعاث المستثار (Stimulated emission) أساس تطور الليزر الذى بدوره له تطبيقات عديد مثل قارئ الأسطوانات المدمجة والاتصال عن بعد من خلال الألياف الضوئية. هل الرغبة فى اختبار نظرية غاية فى النجاح للسبب البسيط - أنها تشرح ظواهر عديدة يعتبر شيئًا جادًا؟ وسوف نبين كيف استطاعت ميكانيكا الكم إحداث انقلاب فى المفاهيم العلمية، حتى الأفكار الأكثر قصرا، التى كلما خرجت دأب الفيزيائيون على تقصى تنبؤاتها الأخاذة معمليا. ولم يتوقف هذه الدأب تبعا للتقدم التكنولوجى. إن من المثير للاهتمام أن معظم هذه الاختبارات أجريت على الضوء والظواهر الكمية التى تصاحبه، بدءًا بأعمال بلانك فى ١٩٠٠، ثم أعمال آينشتين حول التأثير الكهروضونى فى ١٩٠٥.

---

(١٠٢) نص المحاضرة رقم ٢١٤ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١ أغسطس ٢٠٠٠.

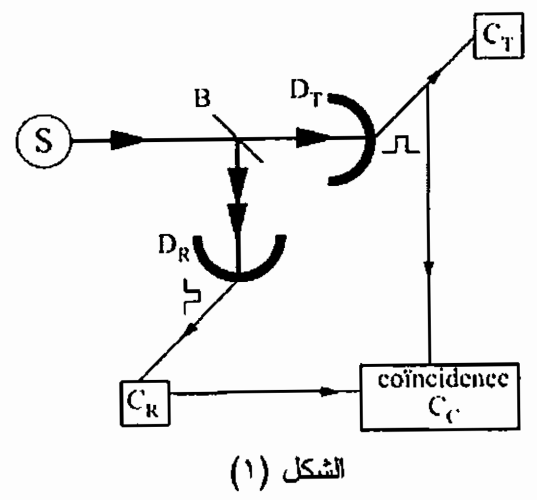
وسوف أتحدث عن نقطتين غاية فى الجمال بداخل نظرية ميكانيكا الكم : أولا ازدواجية الموجة – الجسيم؛ ثم ارتباط آينشتين – بودولسكى – روزين (EPR (Einstein-Podolsky-Rosen)، التى توضح التشابك الكمى. فى نهاية القرن التاسع عشر كانت الفيزياء ترتكز على عمودين أساسيين. فى جهة توجد الجسيمات، وجزئيات المادة وتوصف حركتها بميكانيكا نيوتن الكلاسيكية. هذه النظرية المثمرة التى بفضلها تمكنًا من إطلاق الصواريخ لتقصى النظام الشمسى. وصححت نظرية النسبية بعض المفاهيم فى نظرية نيوتن بحيث تغير إطار المفاهيم تغيرًا طفيفا. ومازلنا حتى الآن نتحدث عن مسارات الجسيمات التى تؤثر عليها القوى وفى الجانب الآخر، توجد الموجات، وفى صفها الضوء، وتشرح نظرية الكهرومغناطيسية انتشار الضوء، مما سمح باختراع آلية لإنتاج موجات الراديو. هذه الموجات لها صفات مشتركة ونموذجية: إنها تتداخل، وتحيد. بالنسبة للفيزياء الكلاسيكية، هذان المجالان (الجسيمات، والموجات) منفصلان.

والعكس يحدث فى ميكانيكا الكم التى تخلطهما. فى هذه النظرية الإلكترون بالطبع جسيم، ولكنه أيضا موجة، بينما الضوء ليس فقط موجة ولكنه أيضا مكون من فوتونات. وسيكون أول اختبار معملى أقدمه هنا حول "ازدواجية الضوء – الجسيمات".

والنقطة الثانية التى لا تتطابق جذريا مع مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية تم وضعها سنة ١٩٣٥ بواسطة آينشتين، ويوجد من الجسيمات ما يمكن أن ينشأ بينها علاقة تثير الدهشة. ونتج عن ذلك جدال طويل ذو طبيعة تبحث عن شرح النظرية وصلاحيتها وحدودها. لقد نشأ هذا الجدال بالذات بين آينشتين وبوهر، ولم يكن لوجود العلاقة EPR التى وضعها آينشتين وزملاؤه إثباتًا عمليا. وبدأ من السبعينيات، وبعد مشاركة جون بل (John Bell) بإضافات فى النظرية بدأت التجارب فى إعطاء إجابات على أسئلتنا. وسوف نكرس الجزء الثانى من هذه المحاضرة لهذا الموضوع.

ولنبدأ بمفهوم ازدواجية الجسيم – الموجة المدهش. هذا المفهوم ظهر للحياة سنة ١٩٢٥ للإلكترون وثبتت صحته ولكنه لم يتم أثبات وجوده فى حالة الضوء إلا منذ السبعينيات تقريبا.

وفى سنة ١٩٨٢، قام فيليب جرنجية (Philipe Grangier) فى معهد البصريات بإيضاح هذه الازدواجية. فى بداية التجربة نحلل الضوء المنبعث من مصدر S عن طريق شريحة نصف – عاكسة B يتبعها كاشفان من واحد موضوع فى مسار الشعاع المنبعث والأخر فى مسار الشعاع المنعكس، الرسم (١). كل كاشف (مضاعف ضوئى) يصدر نبضات كهربائية عند استقباله للضوء. وتزداد النبضات كلما زادت شدة الإضاءة، ويقاس معدل تغيرها عن طريق العدادات C_R، C_T. ولأن الشريحة نصف العاكسة مضبوطة (تسمح ببث ٥٠% من الضوء الساقط وتعكس ٥٠% منه) تحصل على معدلين متساويين.



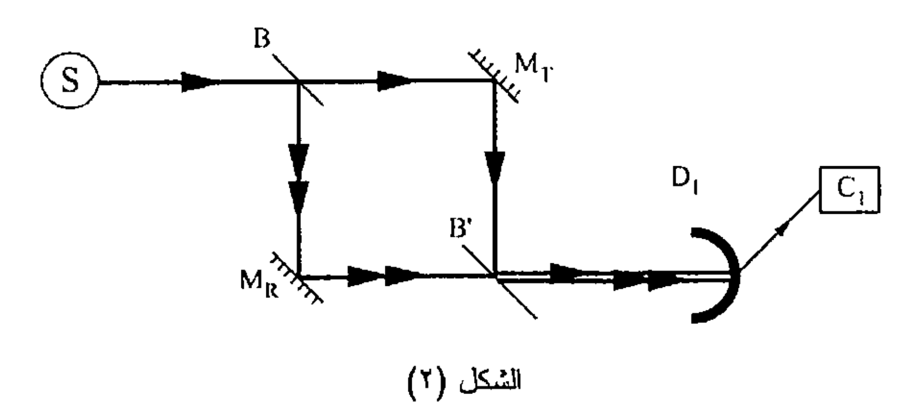
الشكل (١)

يبين كيفية التأكد من الخاصية الجسيمية للضوء المنبعث من مصدر الفوتونات الأحادية S.
ولا نرصد أى كشف فى حالة تطابق على الكاشفين Cs وCc الموضوعان خلف الشريحة نصف العاكسة B. هذا يقودنا إلى وصف الضوء على أنه مكون من حبيبات ضوء (الفوتونات) التى تم إرسالها وانعكاسها من خلال B ولم يتم اقتسامها كما هو الحال بالنسبة للموجات.

ونضيف للآلية عداد C_C للانطباق. وهذا العداد نوعا ما عبارة عـــن ســـاعة غاية فى الدقة، وقادرة على تحديد قراءتين للمسار المنبعث والمنعكس تم حـــدوثهما تباعا فى زمن قريب من ٥ × ١٠^-٩ ثانية (أى ٥ نانو ثانية). ماذا ننتظر من إطار شرح الصفات الموجية للضوء؟

الموجة الساقطة على الشريحة تنقسم إلى موجتين لهما شدة متـــساوية، كـــل واحدة منهما تتسبب فى إنتاج ومضة بكل كاشف فى أزمنة لا نستطيع التنبؤ بهـــا، ولكن متوسط معدلاتها متساو. ونرصد من وقت لآخر وبطريقة عـــشوائية حـــدثين متزامنين فى الكشافين المخصصين للمسار المنبعث والمنعكس: إذا لابد أن نرصـــد عدداً معيناً من التطابقات.

أو عندما حللنا الضوء الصادر من مصدر معين، مصنع لهذه الدراسة، لـــم نرصد أى تطابق. وكما توقعنا فالظواهر التى رأيناهـــا كلهـــا تـــنم عـــن صـــفات الجسيمات: فالتفسير الوحيد لعدم وجود تطابق هو أن هذا الضوء تصرف على أنه مكون من حبيبات "الفوتون" الذى لا يمكن شطر واحد منها لاثنـــين عنـــد التقائـــه بالشريحة نصف العاكسة. والمصدر الضوئى الخاص بهذه التجربة يسمى "مـــصدر الفوتونات المفردة". وتبث فيه الفوتونات واحدا تلو الآخر بفارق زمنى.



الشكل (٢)

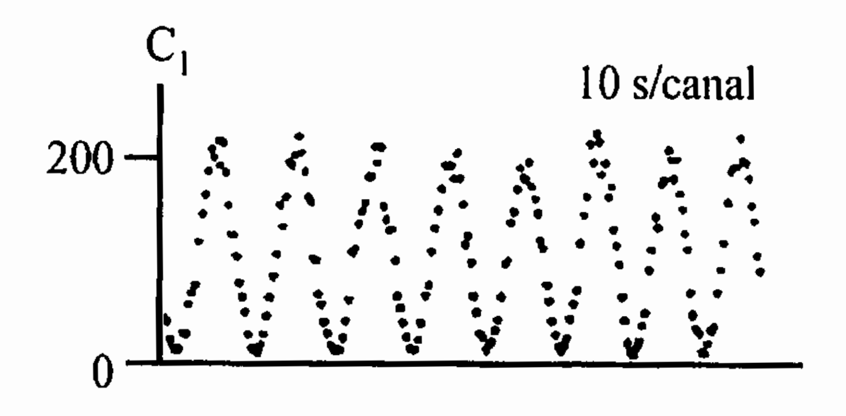
يبين كيفية التأكد من الخاصية الموجية للضوء المنبعث من مصدر الفوتونات الأحادية S مثل تجربة الشكل (١) الأشعة الصادرة من B تنعكس بواسطة المرايا M_T M_R، ثم تتحد على الشريحة B' وتكتشف على D1. ونلاحظ أن معدل الكشف C1 يتم التحكم فيه بدلالة الفرق بين المسارين BM_RB' , BM_TB'. يقودنا إلى وصف هذا الضوء على أنه موجة تم اقتسامها على الشريحة B' مما يؤدى إلى التداخل

ثم نعدل التجربة للآتى بدون تغيير المصدر، استبدلنا الكاشفين بمرآتين تسمحان بإعادة توحيد الشعاعين على شريحة أخرى نصف – العاكسة. ويوضع المكشافان على مسارى الخروج للشريحة العاكسة الثانية (الرسم ٢).

وهكذا استطعنا أن نكون رسمًا تفصيليًا كلاسيكيًا لمقياس التداخل (Interferometer) الذى صممه ماخ – زيندر (Mach-Zehnder)، والذى يسمح لنا بمشاهدة ظواهر معتادة كالتداخل: وإذا عدلنا طفيفا طول ذراع من ذراعى مقياس التداخل (عن طريق تحريك مرآة)

نلاحظ أن معدلات العد عدلت، وتفسر هذه الأحداث فى إطار الخواص الموجية للتجربة (الرسم ٢). فالضوء الساقط ونعتبره موجة جيبية للمجال الكهرومغناطيسى، ينقسم إلى موجتين أقل شدة عن طريق الشريحة الأولى نصف

– العاكسة ثم يتجمع ثانية عن طريق الشريحة الثانية نصف – العاكسة. وبتتبع الطرق التى سلكت بين ذراعى مقياس التداخل، نرى أن الموجتين ستتجمعان فى الطور نفسه أو فى طول متناقص. ويعتمد معدل العد على أطوال ذراعى المقياس: التداخل، وكذلك في التجربة المصاحبة للرسم (٢) يتصرف الضوء المنبعث من المصدر كموجة تنقسم إلى موجتين على الشريحة الأولى وتتجمع لتكون موجة واحدة على الشريحة الثانية. وتجربة الرسم (١) كانت تشرح مفهوما مختلفا جوهريا: الضوء يتصرف على أنه مكون من جسيمات، فالفوتونات عند التقائها بالشريحة نصف – العاكسة، تسلك طريقا أو تسلك الآخر ولكن لا تسلك الطريقين معا. أو السؤال يكمن فى المصدر نفسه والشريحة نفسها، وهكذا تستطيع احتواء مفهوم ازدواجية الضوء عن طريق تعديل الأجهزة المعملية، فمرة يتصرف كأنه موجة تنقسم إلى موجتين، وفى الأخرى يتصرف بالعكس على أنه فيض من الجسيمات التى لا تنشطر ولكن تذهب عشوائيا فى أى مسار.



الشكل (٣)

تداخل لفوتون واحد للتجربة المذكورة فى الرسم ٢. معدل العد المدون عن طريق العداد C1 كدالة فى موقع المرآة MW. ونرصد ترددا كاملاً وتكون دورته تساوى دورة الضوء كما نتوقع لسلوك الموجة

ولا نستطيع أن نقارن الفكرتين. لأننا نتحدث عن واحد من المفاهيم المبدئية في ميكانيكا الكم. ومع أن الصياغة النظرية الرياضية لميكانيكا الكم تأخذ في الاعتبار هذا الازدواج، بسهولة لا توجد صورة تقليدية من الممكن أن تتصوره.

هذه المشكلة تسببت في تساؤلات عديدة وتردد جاد للفيزيائيين. حتى في سنة ١٩١٣ عندما آزر العلماء الأربعة الكبار بلانك (Planck)، وفاربورج (Warburg)، ونيرنست (Nernst)، ورِيبنز (Rubens) ترشيح آينشتين لدخول أكاديمية العلوم ببروسيا (Prussia)، أوضحوا في رسالتهم الآتي: "لا يوجد أدنى شك حول بصمات آينشتين في التساؤلات الكبرى في علم الفيزياء وفي بعض الأحيان يخطئ، كتصوره عن الكم والضوء، هذا شيء لا يؤخذ ضده؛ لأنه ليس من الممكن تقديم أفكار جديدة وأساسية، حتى للعلوم المؤكدة، بدون أن تخاطر من وقت لآخر". وإنه لمثير للضحك أن نعلم أن بسبب هذا التصور حصل آينشتين بعدها بثمانية أعوام على جائزة نوبل، عندما تمكن ميليكان Milikan من إثبات أهمية هذا التصور عمليا حتى يتمكن من فهم ظاهرة الكهروضوئية. وتسبب هذا التصور الجسيمي للضوء في صدمة كبيرة لمفاهيمنا الموجية عن الضوء (التداخل، الحيود...).

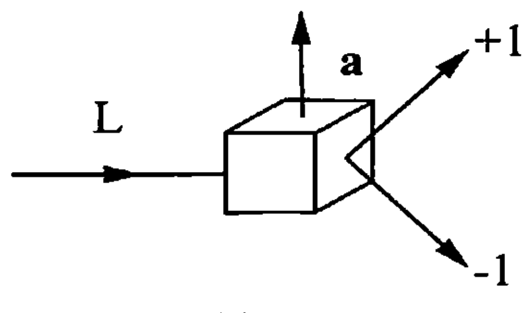
حتى شهد مليكان نفسه في مذكراته في سنة ١٩٤٩ بما يلي: "لقد أمضيت عشرة أعوام من عمري لاختبار معادلة آينشتين لسنة ١٩٠٥، وعلى الرغم من كل محاولاتي لإثبات عدم صحتها. لقد أرغمت على الاعتراف بها في١٩١٥بعد أن رصدتها معمليا دون شائبة، وعلى الرغم من مظهرها غير المنطقي، لأنها تخالف كل ما نعرفه عن الخواص الموجية للضوء...". وفي سنة ١٩٣٢ في أثناء محاضر (القضايا الكلامية) جلسات جمعية العلوم الفيزيائية والطبيعية في بوردوا (Bordeaux)، قام الشاب آلفرد كستلر Alfred Kastler (الذي حصل فيما بعد على جائزة نوبل للفيزياء عن أعماله في علم البصريات) متباهيا بقوله "الجهود الطيبة التي قام بها لويس دوبروجلي (Louis deBroglie) أدت إلى البحث المثير

للإعجاب عن الميكانيكا الموجية أو الميكانيكا الكمية. لكـن (......) هـذا البحـث (.........) يثير قلق الفيزيائيين. لأنه تبعا له، تبقى ازدواجية الخصائص الموجيـة والجسيمية للضوء لغزًا محيرًا".

وهل تم حل هذا اللغز اليوم؟ لقد تعودنا على هذه الازدواجية، ولكننـي فـي الوقت نفسه عاجز عن أن أعطيكم صورة لشيء في الوقت نفسه صورة وجـسيمًا. وكل ما أستطيع أن أقوله لكم إن الصياغة الرياضية، فيما يخصها، تحتوى بطريقة رائعة ومتناغمة المفهومين. فهل هذا يرضينا؟

العلاقات الكمية EPR تسأل أسئلة أكثر تشويشا. تم وضع هذه المشكلة سـنة ١٩٣٥من خلال التجارب التي نسميها التجارب الفكرية EPR ، والتي سأصفها لكم في نسختها الحديثة، والتي أصبحت تجربة حقيقية فيما بعد.

ولنبدأ بشرح مفهوم استقطاب الضوء. من الممكن استقطاب شعاع ضـوئى خطيا، أى أن يتذبذب المجال الكهربى فى مستوى محدد، رأسيا كـان أو أفقيـا أو مائلاً. (ويمكن للاستقطاب أن يكون دائريا أو بيضاويا،... لكن دعنا من التعقيـد). ومحلل الاستقطاب كمنشور والتـسون Wallatson مـن مـادة الـسباث Spath d'Island (أو النسخة الحديثة منها فاصل الاستقطاب ذى الطبقات العازلة) يـسمح بقياس هذا الاستقطاب، لأن الضوء لن يتبع المسار نفسه تبعا لاستقطابه في مستوى متوازٍ أو مستوى عمودى على اتجاه التحليل "a" الذى أعتقد أنه رأسى (الرسم ٤). فى الحالة الأولى، يخرج الأعلـى (الفتحـة ١+)، وفـى الثانيـة يخـرج أسـفل (النتيجة-١). فإذا أشارت عدادات الفوتونات الموضوعة فى مسارات الخـروج أن الفوتونات تخرج من المسار ١+، نستطيع استنتاج أن الاستقطاب مواز لـ a. وإذا خرجت من المسار -١، فالاستقطاب عمودى على a. وفى الحـالات الوسـيطة، تخرج الفوتونات عشوائيا من أى مسلك ولا نستطيع أن نشاهد الاستقطاب إلا عـن طريق إدارة المستقطب للبحث عن الاتجاه `a الذى تخرج منه كل الفوتونات.



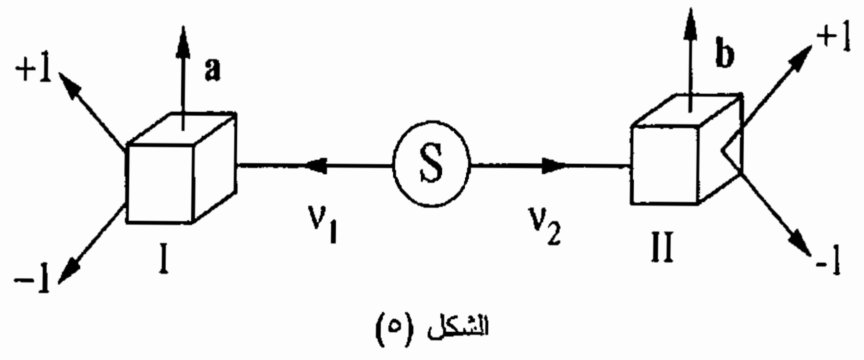
الشكل (٤)

قياس استقطاب الضوء طبقا للاتجاه a. فإذا تم استقطاب الضوء موازيًا للاتجاه a يتم كشفه فى مسار الخروج ١+. أما إذا تم استقطاب الضوء عموديا على الاتجاه a يتم كشفه فى مسار الخروج ١-. أما إذا كان الاستقطاب متوسطًا يصبح مسار الخروج ١+ أو ١- باحتمالات تعتمد على الاستقطاب.

تجربة آينشتين - بودلسكى - روزين (الرسم ٥) تتخيل أن الفوتونات تنبث فى أزواج، فى اتجاهات معاكسة فى حالة (نلقيها اليوم "بالحالة المتشابكة" أو الحالة EPR). لا نستطيع شرحها إلا بنظرية ميكانيكا الكم. هذه الحالة هى تراكب حالتين من السهل شرحهما.

فى الحالة الأولى (المسماة < ↑؛ ↓| فى ميكانيكا الكم)، جسيما الفوتون تم استقطابهما رأسيا؛ وفى الحالة الثانية (المسماة <↔،↔| فى ميكانيكا الكم)، الاثنان تم استقطابهما أفقيا. ولكن حالة التراكب يعبر عنها بـ (<↔ و↔| +)، ليس لدى ما أقوله سوى ن زوجى الفوتون كليهما أصبحا فى "الوقت نفسه" < ↑↓| مستقطبين رأسيا ومستقطبين أفقيا). وترابط الفوتونين بطريقة لا يمكن فكها عندئذ يصبح فقط استقطاب المجموعة له معنى. فى حالة التشابك، لا يمكن أن نتحدث عن الخواص المتفردة لكل فوتون، إلا عند تباعدهما عن بعضهما البعض وعدم تفاعلهما معًا.

ماذا علينا أن نتوقع إذا قمنا بقياس الاستقطاب لجسيمي الفوتون (الرسم ٥)؟ تعطينا ميكانيكا الكم الوسائل الرياضية لحساب احتمال رصد النتائج المختلفة لحالة التشابك: الفوتون الأول فى القناة +١ أو -١ للمحلل I، الفوتون الثانى فى القناة +١ أو -١ للمحلل II. وهكذا نستطيع حساب الاحتمالات السهلة أو المرتبطة. لنبدأ بالسهلة: سنجد مثلا احتمال العثور على +١ للفوتون الأول هو ½ أيا كان اتجاه المحلل a ؛ واحتمال العثور على -١ هو ½ أيضا. نستطيع من هذا أن نقول إن الفوتون الأول ليس له استقطاب مؤكد لأن نتيجة القياس عشوائية أيا كان اتجاه القياس. والموقف نفسه للفوتون الثاني، النتيجة عشوائية أيا كان اتجاه المحلل b وفى الواقع يصبح الموقف غاية فى الأهمية عندما نحسب الاحتمالات المرتبطة لنتائج الفوتونين.



الشكل (٥)

التجربة الفكرية لآينشتين - بودولسكى - روزين على الفوتونين v_1 و v_2 المنبعثين كزوج فى اتجاهين مختلفين. لزوج متشابك فى حالة (EPR) يعطى القياس البسيط على كل فوتون النتيجة +١ أو -١ بالاحتمال نفسه 1/2. ولكن القياس المصاحب لـ v_1 و v_2 نحن متأكدون تماما من العثور على 1+ ل v_1 ومن العثور على 1- ل v_2.

المهم أن عندما نحسب الاحتمالات المرتبطة لنتائج الفوتونين، من الممكن أن نحسب احتمال وجود + ١ للفوتون الأول و+ ١للفوتون الثانى، وتم وضع محللى الاستقطاب فى الاتجاه a وb. فإذا كان المحللان متوازيين تصبح قيمة الزاوية بين

b,a صفرًا، ونجد أن هذا الاحتمال ٢/١. إذًا من الممكن أن نستنتج أن نتائج القياسات التى أخذت كل على حدة ونراها عشوائية هى فى الحقيقة متصلة ببعضها بالكامل. فإذا كان الاحتمال وجود +١ للفوتون الأول يساوى ٢/١، والاحتمال المقترن لوجود +١ للفوتون الأول يساوى ٢/١ و+١ للفوتون الثانى يساوى كذلك ٢/١ عندئذ سيكون الاحتمال الشرطى لوجود +١ للثانى عندما وجدنا الأول فى +١ يساوى ١. ونشرح طريقة أخرى لتمثيل النتيجة كالآتى: عندنا احتمالات متساوية لوجود +١ أو -١ للفوتون الأول وكذلك للفوتون الثانى. ولكن إذا وجدنا +١ للأول فقطعا لابد من وجود +١ للفوتون الثانى. وإذا وجدنا -١ للأول فقطعا لابد من وجود -١ للفوتون الثانى.

وتساءل كل من آينشتين، وبودولسكى، وروزن كيف يحدث (تمثل) هذه العلاقات (التى تنبأت بها ميكانيكا الكم بين نتائج القياسيين التى تم إجراؤها فى مواضع مختلفة وفى أزمنة شبه متطابقة.

ولنحاول أن نكون صورة بدءًا من الصياغة النظرية الكمية. وهذه واحدة، بداخلها نتصور أن الفوتون لا يصل إلى المحلل I فى الأول: نتيجة القياس على العشوائية (+١ أو -١)، ولكن نحصل أيضا على نتيجة أخرى خاصة، لأن فرضية اختزال الحزمة الموجية تحتم على الفوتون المبتعد أن "يكتسب فى الحال" استقطابًا (متوازيًا أو عموديًا على a) مساويًا الـ v_1، هذا يسمح لنا بفهم العلاقات التبادلية، ولكن على حساب صورة غير مقبولة عند والد نظرية النسبية: كيف يمكن لحدث موجود فى المستقطب الأول أن يؤثر لحظيا فى الفوتون المبتعد، إذا لم يتواجد تفاعل تبادلى ينتشر بسرعة أكبر من سرعة الضوء.[١٠٣]

فى الواقع، نستطيع اقتراح صورة أخرى منظور العالم فى مخيلة آينشتين، حيث للأشياء خواص فيزيائية ملتصقة بها، وحيث لا يوجد أى تفاعل - تبادلى

---

(١٠٣)الحد الأقصى للسرعة هو سرعة الضوء.

أسرع من سرعة الضوء. وفى هذه الصورة نتجت العلاقات بين النتائج فـــى I ,II من وجود تطابق فى الخواص بين زوجى الفوتونات أو نتيجة أكثر، نتـــصور أنـــه بعد انبعاثها المرتبط سوف يكتسب زوجى الفوتونات خواص الاســـتقطاب نفـــسها، ويحدد هذا نتائج القياسات التى تجرى على كل فوتون. وهكذا لم يعد هناك صعوبة فى فهم كيفية ترابط هذه النتائج.

بالإضافة إلى أن هذه الخواص الأولية تتغير عشوائيا من زوج لآخر، ندرك سريعا الطبيعة العشوائية المرصودة فى كل قياس تم على حدة.

هذه الصورة طبيعية جدا ومناسبة. فهى تتبع أثرًا يتبناه طبيب تبـــين لـــه أن التوأم يتأثر بالأمراض بطريقة مترابطة (إما أن الاثنـــين يـــصابان معـــا وإمـــا لا يصابان معا، ولكن لا نجد أبدا أن أحد التوأمين مريض وأخـــاه التـــوأم معـــافى)، وحينئذ ندرك أن هذه العدوى لها طبيعة جينية، مرتبطة بوجود واحد أو أكثر مـــن الكروموزمات المتشابهة.

ورفض نيلز بوهر Niels Bohr فى الحال هذا الاستنتاج لآينـــشتين. وفـــى الواقع كان الفيزيائى النرويجى مقتنعًا تماما أن ميكانيكا الكم تعطى المعرفة الشاملة للأشياء، ولا يمكن وجود معرفة أكثر اكتمالاً. أو أن الـــصياغة النظريـــة الكميـــة تشرح كل الأزواج EPR بالحالة الكمية نفسها ($|\uparrow\downarrow\rangle + |\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle$)، بينمـــا فـــى تفسير آينشتين، الفوتونات ليست كاملة متشابهة، لأن هناك صفة مميـــزة زائـــدة لا نراها تفرق بين الأزواج: مثلا البعض عنده $|\uparrow\downarrow\rangle$ والآخر $|\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle$.

وامتد الجدال بين العملاقين (آينشتين وبوهر) لمدة عـــشرين عامـــا، حتـــى مماتهما. وليس الموضوع عبارة عن انفراج فى الأحداث، ولكنـــه جـــدال حـــول تفسيرات ميكانيكا الكم. لم يكن آينشتين يشك فى حسابات الكم التى تتنبأ بالعلاقـــات EPR. ولكنه ظن فقط أن الصياغة النظرية لميكانيكا الكم لا تعطى وحدها الوصف الكامل لزوج الفوتونات وأنه لا يدمن استكمالها. وأدى تحليله للحالـــة EPR إلـــى استنتاجه وجود واقع فيزيائى كامن ودقيق جدا، ولابد من البحـــث عـــن الـــصياغة

الجيدة لإضافته. وظن بوهر أن هذا البحث سيلاقى الفشل، لأن معرفتنا محدودة ومحددة وأن مبدأ هايزنبرج أشار إلى هذه الحدود. وإذا كان هذا الجدال أولى بالنسبة لمجال المفاهيم إلا أنه لم يضف الجديد ولم ينتج عنه شىء يذكر فى الفيزياء.

وفى عام ١٩٦٥، تغير طابع المشكلة بظهور جون بل (John Bell) من CERN إلى الصورة وعن طريق استخدام أفكار آينشتين، قام بإدخال "بارميترات زائدة" λ (المسماة أيضا المتغير المخبأ) ومتشابهة لأفراد الزوج نفسه من الفوتونات، ومن ثم أمكن تحديد نتائج القياس على كل فرد من الزوج. إذن توجد دالة A(λ,a) تمثل النتيجة −١أو +١ للقياس بالمستقطب I (فى التوجه a) لفوتون له بارميتر λ ؛ وبطريقة مشابهة توجد دالة أخرى B(λ,b) تمثل نتيجة القياس المستقطب II. وفى المصدر سوف يحدد عامل عشوائى البارميتر λ الخاص بكل زوج من الفوتونات ونصف هذا العامل بكثافة الاحتمال ρ(λ). فإذا عرفنا الكميات ρ(λ), B(λ,a), A(λ,a) (التى تناسب نموذجًا له بارميترات إضافية خاصة)، نستطيع أن نستنتج احتمالات نتائج القياسات، البسيطة أو المترابطة. ومن الممكن حساب معامل ترابط الاستقطاب E(a ,b) الذى يصف درجة الترابط بين نتائج القياسات كدالة فى الزاوية (a ,b) بين المستقطبين. الأمل إذن فى إيجاد نموذج خاص يعطينا معامل ترابط الاستقطاب E(a ,b) مطابقا للكمية E(a ,b) التى تنبأت بها ميكانيكا الكم.

وفى هذه الحالة يمكن للعلاقات المترابطة EPR أن تفسر بالصورة التى أرادها آينشتين.

وكان اكتشاف بل أن هذا الأمل خائب. فنظرية بل تشرح لنا أن هذا نموذج من ذلك النوع لا يستطيع أن ينتج كل التنبؤات التى تحصل عليها من ميكانيكا الكم لكل التوجهات المختلفة b,a للمستقطبين. وبدقة أكثر، اهتم بكمية أسماها S تضم أربعة معاملات للترابط مصاحبة لتوجهين a` ,a للمستقطب I ولتوجهين b` ,b.

للمستقطب II. وأشار إلى أنه إذا أمكن شرح هذه العلاقات المترابطة عــن طريــق هذه البرميترات الإضافية كما فى الرسم، لن تزيد قيمة S عن ٢، ولن تقل عــن – ٢. أو أنه من السهل إيجاد توافقات للتوجهات (a, a`, b ,b`) ومن خـــلال حـــسابها كميا نحصل على قيمة لــ S أكبر من 2 (مثلا يمكــن أن نحــصل علـــى = S_{QM} $2\sqrt{2}$). وفى هذه الحالات، تكسر ميكانيكا الكم عدم التساوى لبل: إنها إذا لا تتفق مع النماذج ذات المتغيرات المخبأة.

وبالتناقض مع ما كان يظنه آينشتين، لا نستطيع فى الوقت نفـسه الوثـوق بالتنبؤات الكمية للعلاقات المترابطة EPR والرغبة فى وصف هذه العلاقات بهـذا النموذج الطبيعى الذى يلتقط أفكار آينشتين والـــذى مـــن خلالـــه فـــرض أن زوج الفوتون له منذ البداية صفات سوف تحدد نتيجة القياس فيما بعد. وعند هذا الحـــد، كان باستطاعتنا أن نظن أن ميكانيكا الكم أثبتت نجاحها فى الكثير مـــن التجـــارب المعملية، وأننا ينبغى أن نلفظ النماذج ذات البرميترات الزائدة. وفى السنوات التالية لمقالة بل، أدركنا أن حالات التشابك أو عدم التوافق غاية فى الندرة ولا يوجـــد أى معطيات معملية تمكننا من تعريفها. ألا نستطيع إذن أن نتخيل أن التنـــاقض بـــين التنبؤات الكمية و(عدم التساوى) متباين؟ بل مما يشير إلى حـــدود تنتهـــى عنـــدها فعالية ميكانيكا الكم؟ من أجل المعرفة لابد أن نسعى إلى تجارب أخرى.

وبدأت سلسلة من التجارب فى الولايات المتحدة فى أوائل السبعينيات. وبعد بعض النتائج المتناقضة انحاز هذا الجيل الأول من التجارب لصالح ميكانيكا الكـــم. وكانت الرسوم التفصيلية لهذه التجارب بعيدة قليلا عن الرسم (٥) ويرتكز تفسيرها على عدة فرضيات زائدة، منطقية بلا شك،ولكنها قابلة للمعارضـــة مـــن مؤيـــدى المتغيرات المخبأة.

ولكى نقترب من النظام الأمثل الذى بنيناه فى معهد البصريات فـــى أورس (Orsay) فى بداية الثمانينات، استخدمنا فى التجربة التقدم المهول فى مجال الليزر وأجهزة القياس الكهروضوئية Optoelectronique، والسيطرة على التجارب عـــن

طريق الحاسوب. لقد بنينا أولا، بفضل استثارة اثنين من الفوتونات عــن طريــق جهازى ليزر مصدر لأزواج من الفوتونات متشابكة أكثر فاعلية آلاف المرات من السابقة. وأيضا التطور فى أساليب الطلاء المتعددة (وضع طبقــات مــن المــواد) الطبقات للعازل الكهربانى (دى إلكتريك dielectrique) سمحت لنا ببنــاء محللــى استقطاب ممتازين. ثم استعرنا من الفيزياء النووية أساليب تقنيات الكشف بالتطابق لأكثر من كاشف. ومجموع هذا كله مكننا سنة ١٩٨٢ مع فيليب جرنجى Philippe Grangier وجيرار روجى Gerard Roger من عمل تجربة تشبه إلى حــد كبيــر الرسم (٥). والنقطة المدهشة هى أنه بعد أول تشغيل بمقدار ١٥٥ ثانية، اســتطعنا قياس معدلات التطابق الأربعة -N+,N-,N-+,N+ المصاحبة لكل توجه لـــ (a,b) للمستقطبين، ومن ثم استنتاج قياس معامل الترابط E(a,b) لهذا التوجه. وبتكــرار هذا القياس للتوجهات الثلاث الأخرى (a,b`), (a,b), (a`,b`) نحصل علــى القــيم المقاسة $S_{exp}$ (a,a`,b,b`)، الكمية الموجودة فى متباينة بل. طريق اللعب باختيــار التوجهــات (التــى عنــدها تتنبــأ ميكانيكــا الكــم بــأكبر انتهــاك)، وجــدنا أن $S_{exp}= 2.697 \pm 0.015$ مما يناقض بشدة متباينة بل $S \leq 2$ ويتفق بشدة أيضا مــع التنبؤات الكمية لهذه الحالة المعملية. هل توصلنا قطعيا إلى هدفنا؟

فى الواقع منذ بدأ برنامجنا، حلمنا بالذهاب إلى أبعد من هذا والتعمــق فــى الأسئلة التى أثارها جون بل منذ مقالته الأولى عن التمركز.

وعن ماذا يتحدث؟ فإذا أخذنا الصياغة التى أدت إلى متباينة بل، ندرك أنهــا تحتوى بطريقة ضمنية على الفرض القائل بأن نتيجة القياس للمستقطب I لا تعتمــد على التوجه b للمستقطب II (وإلا كان قد كتب A(λ,a,b) بدلا من A(λ,a)).

ومن الواضح أيضا أن إجابة المستقطب II التى نعتقد أنهــا مــستقلة عــن المستقطب I، وكذلك عن التوجهات a, b للمستقطبين القائمين بالقياس (الذى تكتبــه ρ(λ) وليس ρ(λ,a,b,). هذا الغرض لا يمكن الاستغناء عنه للوصول إلى متباينة بل. إنما تظهر على أنها طبيعية ولكن فرض جون بل أنه لا شىء يتعارض، فــى

تجربة يتواجد بها مستقطبان غير متحركين، حينئذ يتسبب التفاعل التبادلى بين المستقطبين والمصدر فى خطأ هذا الغرض، وفى المقابل إذا استطعنا بناء تجربة يمكن فيها تغيير توجهات المستقطبين عشوائيا وبسرعة، مع أزمنة خاصة قصيرة بالنسبة لزمن انتشار الضوء بين المستقطبين، وعندئذ سيصبح فرض التمركز (المحلية) نتيجة لمبدأ السببية النسبى. طبقا لمبدأ السببية لا ينتشر أى تفاعل بسرعة أكبر من سرعة الضوء. ونفهم فى هذه الحالة، أن طريقة تحضير الزوجين لا تعتمد على التوجهات b,a للمستقطبين اللذين يقومان بالقياس، لأن هذه التوجهات تختار بعد انبعاث الفوتونات أثناء انتشارها نحو المستقطبين. سوف تشير مثل هذه تجربة إلى تصادم مفاهيم آينشتين وميكانيكا الكم.

فى تجربتنا، نستخدم محللات للاستقطاب لها كتل تزن بضع عشرات من الكيلو جرامات وكان من المستحيل تحريكها فى مقدار النانوثانية. ولكننا نجحنا فى إجراء أول تجربة بها مستقطبان متغيران فى وجود جون داليبار الذى التحق بمجموعتنا. وكانت البراعة فى استخدام نظام بصرى ابتكرناه، مبدل سريع قادر على إرسال فوتون إلى صوب المستقطب I فى التوجه a أو صوب المستقطب I` فى التوجه a`. المجموعة تكافئ مستقطبًا واحدًا يتحرك بسرعة كبيرة بين التوجهات a`,a. ويسمح جهاز قياسى بتحليل الفوتون $v_2$ صوب التوجه b أوالتوجه b`. واستطاع الميدلان السريعان الموضوعان على مقربة 12m كل من الآخر أن يدور كل ١٠ نانوثانية أسرع من زمن انتشار الضوء بينهما (٤٠ نانو ثانية)، وكانت هذه التجربة فى حدود المستطاع لسنة ١٩٨٢، ولم تكن كاملة لأن أرجحة المستقطبين لم تكن عشوائية تماماً. مما جعلنا نظن أنه إذا كان من المكن إثبات خطأ ميكانيكا الكم فى تجربة من هذا النوع، فلابد أن يظهر هذا فى الإشارات المعملية. ولكن النتائج خرجت لصالح نظرية الكم، وضد النظريات الموضوعية للمتغيرات المخبأة.

وفى سنة ١٩٩٨، تم إجراء تجربة ثانية بمستقطبين متغيرين فى إنسبروك فى فريق آنتون زايلينجر (Anton Zeilinger). استفادت هذه التجربة من ظهور

الجيل الثالث لمصدر فوتونات الـــ EPR والفائدة المهمة جدا لهذه المصادر تكمـــن فى إمكان حقن الفوتونات فى ألياف ضوئية، مما يؤدى إلى نتائج مدهـــشة. وعـــن طريق استخدام الألياف الضوئية (Fibres optiques) لشبكة التليفونات السويـــسرية استطاع نيكولا جيزن (Nicolas Gisin) إبعاد هذه المستقطبات مسافة 30km عـــن المصدر! فى تجربة إنسبروك Innsbruck، تنتشر الفوتونات فى 400m فقط مـــن الألياف البصرية ولكن هذا التأخير كافٍ للسماح بأرجحة عـــشوائية للمـــستقطبين. أكدت هذه التجربة القريبة جدا من الكمال، أننا نستطيع أن نرصد التـــرابط الكمـــى وأن متباينة بل (Bell) لا تُستوفى.

لابد أن نصل لليقين بشأن أن الفوتونات المتشابكة لها سلوك "التوأم الكمـــى": وهكذا يصبح شرح الترابط المرصود بعيدًا عن متناول الفهم الكلاســـيكى العـــادى، المشابه للصفات الوراثية المشتركة. الترابط الكمى له طبيعة مختلفة ونستطيع التأكد من وجوده عن طريق التجربة.

ماذا نستنتج؟ رأى آينشتين الذى لم يكن يعلم بقانون بل، أنها فرضية عجيبة. لأننا سنكون مضطرين للاستسلام إلى تفسير الترابط عن طريق نمـــوذج أو كـــل فوتون لأنه بعد أن يتم فصله عن توأمه، يصبح لديه حقيقة فيزيائية ذاتيـــة. عندئـــذ يتواجد الترابط المشترك بين هذه الحقائق الفيزيائية المنفـــردة فـــى الزمكـــان. وإذا استبعدنا هذا التفسير كما يقول آينشتين فينبغى أن:

- نسقط مطلب الوجود الذاتى للحقيقة الفيزيائية الموجودة فى مختلـــف أجـــزاء الفضاء.
- أو نقبل أن القياس على نظام يغير (لحظيا) الحالة الواقعية لنظام آخر بعيد.

الاختيار الأول ينص على عدم قبول فكرة تشكيل الفوتونات لكينونة مـــستقلة بعد انفصالهما فى الزمكان. مما يقودنا إلى الاعتراف بـــأن جـــسيمين متـــشابكين ومتباعدين، يشكلان كيانًا غير منفصل، لا يمكن وصفه إلا بكينونة عامـــة. وفـــى الواقع مبادئ نظرية ميكانيكا الكم (حيث يوصف زوج متشابك بمتجه عام) تقتـــرح قبول هذا الاستنتاج.

الاختيار الثانى: ينص على قبول أن المؤثرات تنتشر بسرعة أكبر من سرعة الضوء، على الأقل بالنسبة للنظم الفيزيائية المنفصلة فى الزمكان. وحتى لو قبلنا بهذا الاستنتاج، هذا لا يسمح ببث رسائل أسرع من سرعة الضوء لإطلاق صاروخ أو طلب عملية بيع أو شراء فى بورصة طوكيو.. أو باغتيال آبائنا قبل ولادتنا!

وفى الواقع، أنا لست متأكدًا من أن الاختيار الثانى (يوجد مؤثرات لحظية بين النظم المنفصلة) يختلف جذريا عن الاختيار الأول (الفوتونات المتشابكة تشكل كينونة لا تنفصل) كيف يمكن لنا أن نتصور أن شيئين يتفاعلان لحظيا وهما متباعدان؟ ولهذا أفضل أن أستنتج أن نظامين متشابكين يكونان كيانًا لا ينفصل فى الزمكان.

ولأنهى الموضوع، أود أن أشارككم دهشتى لمشاهدة هذه المناقشات المهمة عن مفاهيم ميكانيكا الكم، والتى فتحت المجال فى السنوات الأخيرة لأفكار عن تطبيقات التشابك الكمى. وقطعا لا ينطوى هذا على بث إشارات بسرعة أكبر من سرعة الضوء. ولكن التشفير الكمى يؤهلنا للاستفادة من صفات القياسات الكمية (التى تصيب الحالة الكمية للنظام الذى يجرى عليه القياسات بالاضطراب) لضمان عدم التجسس على الاتصالات. وسمعتم – لا شك – عن الانتقال الكمى عن بعد، تعبير نسمعه بطريقة مستهلكة ولكنها ظاهرة تثير إعجاب الفيزيائيين لأنها تصنع نسخة وفية عن بعد لحالة كمية (عن طريق تدمير الأولى) مع أن القوانين الأولية لميكانيكا الكم تحظر علينا معرفة هذه الحالة بالكامل. أما بالنسبة للحاسب الكمى المبنى على الحالة المتشابكة، سوف يصبح لديه طاقة حسابية مذهلة أكبر بكثير من قدرة الحاسب التقليدى (انظر إلى محاضرة سرج هاروش Serge Haroche) على شرط أن نستطيع الإجابة عن السؤال التالى: هل هذه الظواهر الكمية محصورة فى الأشياء لامتناهية الصغر أم من الممكن ملاحظتها على الأشياء العينية (لكى لا نتحدث عن الكائنات الحية مثل خطة شرودنجر المسكينة)؟ ونعلم اليوم أن ظاهرة عدم التماسك تدمر التشابك الكمى بطريقة أكثر فاعلية كلما كبرت الأشياء. ولكننا

لم نثبت مثلا الاستحالة المطلقة لوجود تشابك كمـــي لأشـــياء أكثـــر تعقيـــدا مـــن الفوتونات البسيطة. ما زال هناك تحد جميل أمام التجريبيين.

الضوء (١٠٤)

بقلم: ميشيل بلاى
Michel BLAY

ترجمة: د. هدى أبوشادى

لم تعرف النظريات الفيزيائية للضوء (أى الدراسات على الضوء والظواهر المتعلقة به) تقدما إلا منذ بداية القرن السابع عشر. هذه البدايات التى نستخدم بعضها للآن. وفى الواقع انحصرت الدراسات العتيقة فى إطار دراسة الأفكار المتركزة على مشكلة الرؤيا والنظر وليس عن دراسات طبيعة الضوء.

واستطاع يوهان كبلر (١٥٧١-١٦٣٠) Johannes Kepler عن طريق تطوير أفكار ابن الهيثم المعروف فى الغرب باسم الحسن (٩٦٥-١٠٣٩) وروبير جروستست (١١٧٥-١٢٥٣) Robert Grosseteste وجون بيشام (١٢٣٠-١٢٩٢) John Pecham وويتلو أو فيتليون (١٢٣٠-١٢٨٥) Witelo ou Vitelion من تكوين جهاز بصرى يستخدم بالعين يؤدى إلى تكوين صورة حقيقية على عدسة العين. وبدأت الفيزياء البصرية باكتساب ذاتيتها؛ وأصبح تحليل الضوء، عن طريق تحرره من مشاكل قوة وحساسية الإبصار موضوعا رائعًا للبحث.

وبدأ توزيع جديد للعلوم على يد يوهان كبلر ورينيه ديكارت (١٥٩٦-١٦٥٠) Rene Descartes الذى أتاح لنا أن نحصل على ثلاثة مجالات للبحث: الطبيعة الفيزيائية للضوء، وبث الصورة الواقعة على عدسة العين إلى المخ (تشريح وفسيولوجيا)، والتمثيل العقلى لها. وسوف نشرح فقط المجال الأول: تاريخ النظريات الفيزيائية للضوء.

---

(١٠٤)نص المحاضرة رقم ٢١٥ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢ أغسطس ٢٠٠٠.

المسألة الميكانيكية الديكارتية

كان تطور النظريات الفيزيائية للضوء فى القرن السابع عشر مصاحبًا لبناء نماذج ميكانيكية تشرح فقط عن طريق استخدام مفاهيم الفيزياء الميكانيكية الخواص المعروفة للضوء مثل الانتشار الخطى، والانعكاس والانكسار، أو مصدر الألوان؟

هذا النمط من التفكير بدأه ديكارت. فى العالم الديكارتى، يتصف انتشار الضوء بانحنائه للحركة، أو على أنه دفعة أو مجهود أى أن الانتشار يحدث دون انتقال مادى.

لنتحدث عن بعض من الصفحات الأولى لبحثه "انكسار الضوء وتركيزه" Dioptrique (دراسة علم البصريات بالعدسات) الذى نشر سنة ١٦٣٧ بعد كتابة محاضرة عن الوسائل فى الهندسة والظواهر الجوية. يقدم ديكارت ثلاث "مقارنات" لتساعدنا على فهم الضوء: "بالطريقة التى أراها ملائمة، لشرح كل خصائص الضوء التى نعرفها من خلال التجارب، ولكى نستنتج بعد ذلك الخواص الأخرى التى ليس من السهل ملاحظتها". وفى المقارنة الثالثة (بعد المقارنة بين عصا الأعمى وحوض العنب)، المخصصة لشرح ظواهر الانكسار والحيود، يشير ديكارت إلى حركة كرة تصدم سطحًا. وعن طريق دراسة هذه المقارنة وهذه الحركة فى المحاضرة الثانية، استطاع ديكارت استنتاج قانونه الشهير بأن جيب زاوية السقوط يساوى جيب زاوية الانكسار (مع الاعتراف بأن هذا القانون تم استنتاجه من قبل فى القرن التاسع على يد العربى ابن سهل واستطاع بعده بثمانية قرون كل من العالمين توماس هاريوت (Thomas Harriot) وسنل (Snell) وعن طريق ذلك، استنتج أن الضوء ينتقل بسهولة (على رسله) فى المواد الصلبة مثل الكريستال أكثر من المواد المائعة مثل الهواء.

هذه النتيجة عارضها منذ ١٦٥٧ بيير فرمات (Pierre Fermat) فى مراسلاته مع مارين كورو (Marin Cureau). واعتمد فرمات فى الوقت نفسه على المبدأ الذى يدعى أن الضوء يسلك دائما المسار الذى يقلل من زمن الانتقال

وعلى طريقته الرياضية الجديدة واستطاع من خلالهما أن يصل إلى قانون الانكسار مع فرض أن سرعة انتشار الضوء فى الأماكن غير المطروقة (القليلـــة الكثافـــة) أكبر من الموجودة فى الأماكن الكثيفة.

وإذا كان ديكارت يعتبر أن انتشار الضوء عبارة عن انحنـــاء للحركـــة دون انتقال مادى، تفتح المقارنة الثالثة الملقبة "انكسار الضوء وتركيزه" الأبواب لفرضية أن الضوء له خواص جسيمية.

وظهر فى مناقشات ديكارت وأبحاث فرمات الجدال الأكبر الـــذى ســـيطر سنوات عديدة على القوانين الفيزيائية الخاصة بالضوء: هل الـــضوء عبـــارة عـــن موجة، أى أن الحركة تحدث دون انتقال للمادة أم أنها إزاحة ماديـــة (جـــسيمات، سوائل...)؟

وقبل أن نصل إلى المواضيع النظرية وتحليل هذا الجدل الذى أخـــذ شـــكله النهائى مع أعمال كريـــستيان هـــايجنز (١٦٢٩-١٦٩٥) Christiaan Huygens وإسحاق نيوتن (١٦٤٢- ١٧٢٧) Isaac Newton، لابد لنا أن نبدأ أولا بالإشـــارة إلى الاكتشافات المعملية (التجريبية) الأولية التى ظهرت فى النصف الثـــانى مـــن القرن السابع عشر.

الاكتشافات المعملية

الحيود الضوئى:

بدأت التجارب الأولى على الحيود الضوئى Diffraction بأعمال فرانشسكو ماريا جريمالدى (١٦١٨-١٦٦٣) Francesco-Maria Grimaldi، والتى قـــدمها فى عمله الكبير الملقب بـــ "الفيزياء الرياضية للضوء، الألوان والعدسات" (بونانيا، ١٦٦٥). وكان لجريمالدى الفضل فى تقديم مفهوم الحيود ليصف الظواهر الجديـــدة التى اكتشفها.

وعن طريق استخدام شعاع غاية فــي الدقــة للــضوء الطبيعــي اســتطاع جريمالدى أن يرصد مثلا أنه فى حجرة مظلمة، عند وضع جسم صــغير بــداخل مخروط ضوئى خارج من فتحة صغيرة، فالظل الذى نراه على حائل أبيض لــيس كما تتوقعه الفيزياء الهندسية، منفصلاً تماما عن مجال الإضاءة، ولكن الظل تلحقه سلسلة من الإطارات المضيئة المتسلسلة المنيرة series lucidae والملونة.

وضاعف جريمالدى التجارب، ونتيجة لتجاربه العديــدة رفــض فكــرة أن "المتسلسلة المنيرة" سببها الضوء المباشر أو الضوء المنكــسر (لأن المتسلــسلة لا تعتمد على طبيعة الحائل) أو حتى الضوء المنعكس (لأنها لا تعتمــد علــى حافــة الحائل). واستطاع جريمالدى أن يقرر أن الضوء لابد له أن ينتشر بطريقة متفــردة عن هذه الطرائق الثلاث وأعطى لهذه الطريقة اسم "الحيود".

رصد ظواهر التداخل:

الأعمال الأولى التى تواصلت بجدية مع هذه الظاهرة تعود إلــى مــشاهدة العلماء للألوان المتعددة على أسطح الشفرات الحادة. أدت هذه الظاهرة إلى عمــل رائع لروبرت بويل (١٦٢٧-١٦٩١) Robert Boyle ظهر تحت عنوان "التجارب والاعتبارات ملامسة الألوان"، بلندن سنة ١٦٦٤.

واسترسل روبــرت هــوك (١٦٣٥-١٧٠٣) Robert Hooke فــي هــذه الدراســات فى عمله المكرس لدراسة الظواهر الميكروسكوبية، وسمى هذا العمــل بــ "الصورة المجهرية" فى لندن سنة ١٦٦٥. ولاحظ هوك أن التلون يحدث علــى شريحة حادة وشفافة محدودة بسطحين عاكسين، لهما قابلية لكسر الضوء مختلفــة عن الشريحة. فإذا عدلنا فى سمك هذه الشريحة حتى قيمة عليا وأخــرى ســفلى لا نرى هذه الألوان، وتظل الشريحة شفافة. استرسل هوك فى تجاربه حتى أدرك، مع آخرين، أنه عندما يضع عدستين واحدة أمام الأخرى نرى ما نلقبه الآن "بحلقــات نيوتن". هذه الظواهر شرحت باستفاضة منذ القرن التاسع عــشر تحــت عنــوان التداخل.

قوة الانكسار الثنائى

فى سنة ١٦٦٩، اكتشف إيراسم بارثولين (١٦٢٥-١٦٩٨) Erasm Bartholin قوة الانكسار الثنائية[١٠٥] (birefringence) عن طريق استخدام كريستالات الكالسيت. ونشر فيما بعد ما رصده فى مذكرات صغيرة أسماها "الكريستالات الإيسلندية الكالسية" فى كوبنهاجن (١٦٦٩). وشرح فى مذكراته الصغيرة كيف أن هذه الكريستالات تصنع من صور الأجسام أزواجا أو الكتابات التى توضع فوقها وأعطى هذه الظاهرة الاسم الذى تحتفظ به إلى الآن، الانكسار العادى والانكسار فوق العادى.

سرعة الضوء

فى سنة ١٦٧٦، فى أثناء زيادة عالم الفلك أوليه رومر (١٦٤٤-١٧١٠) لمرصد باريس الذى كان قد تم إنشاؤه حديثا آنذاك، استنتج من عدم الانتظام الواضح فى دورات الأقمار التابعة لكوكب المشترى طريقة لحساب سرعة الضوء ونشرت نتائج عمله فى مجلة العلماء فى يوم الإثنين ٧ من ديسمبر ١٩٧٦. وتوصل رومر إلى قيمة تقريبية لسرعة الضوء حوالى 215000km/s وأثبت أن الفرضية التى فرضها ديكارت عن انتشار الضوء الفورى ليس لها أساس. وتسببت أعماله وملاحظاته فى إصلاحات كاملة للمفاهيم البصرية الديكارتية.

وكان حلم بناء نظرية متجانسة لطبيعة الضوء تستطيع شرح كل الخواص والنتائج عمل فى غاية الصعوبة وأرق العلماء إلى منتصف القرن الرابع عشر. ثم مرت النظرية فيما بعد بأعمال نيوتن وبناء الحدث الشامل لدراسة تعددية الأضواء المتجانسة.

---

(١٠٥)انكسار الضوء عند مروره فى مادة متباينة الخواص (لا تناحية) فى اتجاهين مختلفين لتكوين شعاعين.

نيوتن
الحالة العامة لتعددية الأضواء المتجانسة

بسبب الحالة الوبائية لمرض الطاعون الذى اجتاح إنجلترا وحريق لندن سنة ١٦٦٦ والذى أدى إلى إغلاق الجامعة، آوى نيوتن إلى لينكولنشاير Lincolnshire موضع ولادته حيث أجرى أبحاثه الأولى على الضوء والألوان. وظهرت هذه الأبحاث فى كشكول للملاحظات من عام ١٦٦٤ و١٦٦٦ فى هذه الحقبة، أثارت نظرية تولد الألوان القضايا الأرسطوطاليسية. هذه النظرية التى اعتبرت اللون الأبيض لونًا نقيًا ومتجانسًا بينما كل الألوان تتصف بإشراقتها وقوتها نتيجة لإضافة وقعت (تضاؤل أو إظلام) على الضوء الساقط. وتتابع الألوان يحدث عندما يصير الضوء ضعيفا أو داكنًا: الأحمر لون مشرق، يحتوى على أبيض كثير وأسود أقل من الألوان الأخرى، والأخضر به أسود أكثر من الأبيض والبنفسجى به أسود أكثر من الآخرين. هذه النظرية التى ليس لها مساندة كمية قادرة على تحديد مفهوم القوة والضعف، والإظلام والإثارة، لا تجد لها أساسًا أو تثبت قدرًا من الذكاء إلا عن طريق الرجوع إلى الانطباعات المشاهدة فى حواسنا وعلى الطريقة التى تؤثر علينا حديثا وعن إحساسنا بالألوان، وسنوضح بعض الأمثلة عن معانى هذه النظرية وأشكالها المتنوعة.

وهكذا قام جيامباتيستا ديلابورتا (١٥٣٣-١٦١٥) Giambattista della Porta بشرح تجاربه مع منشور فى الاقتراح ٢٦ من كتابه "الانكسار البصرى وشواهد جديدة" فى نابولى (١٥٥٨). فى كتابته، أشار بوضوح أن الألوان تعتمد على سمك البللورة التى مر بها الضوء، أى تعتمد على درجة استقرار أو نقاء المادة: الألوان الأكثر حياة (كالأحمر، والأصفر) تظهر فى القمة والأكثر قتامة (الأخضر والأزرق) تظهر فى القاعدة.

وتحليل مماثل أعطاه لنا ماركو آنتونيو دودمنييس (١٥٦٦-١٦٢٤) Marco Antonio de Dominis فى كتابه عن الألوان وأثر البللورات على رؤيتها فى

فينيسيا (١٦١١): "تستطيع القول بأن هناك ثلاثة ألوان متوسطة. الأولى تعمل على إدخال العتمة (عدم الشفافية) بكمية معينة تُدكن اللون الأبيض، وهكذا يتولد الأحمر وهو الأكثر إنارة (maxim lucidus) بين الألوان المتوسطة التي يحدها طـرفين: الأبيض من جهة والأسود من جهة أخرى. وهكذا تتفق بطريقة واضحة مع تجربة المنشور (عن الزجاج الثلاثي الجوانب)؛ فأشعة الشمس التي تدخل من خلال أقرب مكان إلى رأس المنشور، أي التي لها أقل سمك ومن ثم أقل عتمـة تولـد اللـون الأحمر؛ وبسمك أكبر يخرج الأخضر ثم أخيرا البنفسجي عند أكبر سـمك. وكلمـا زادت العتمة، مال اللون إلى البنفسجي أو الأزرق الذي يعتبر اللون الأكثر عتمة.

وفي خلال القرن السابع عشر، ظهرت أبحاث متـأثرة بالقـضايا الفلـسفية الميكانيكية وأعمال ديكارت. وكانت الأبحاث تدور حول النظريات الخاصة بتولـد الألوان، عن طريق نماذج ميكانيكية مفصلة ومفاهيم تقليدية. وطبقا لديكارت، الذي مدد فعالية نموذجه الميكانيكي للضوء (الذي أوضحناه فيما قبل) الذي توصل إلـى أن تعددية الألوان إنما هي تمثيل حدثي لقابلية مختلفة على الدوران، دوران نتج من انكسار، أو كريات من المادة الثانية التي أدى أثرها الخطي إلى بث الـضوء مـن المصدر إلى العين. هذا النموذج ليس له أي أساس كمي: كيف يتسنى لنا أن نحسب السرعة الزاوية لهذه الكريات غير المرئية ونرى حركتها أو قابليتها للحركة وكـل هذا من فروض النموذج، وكيف إذا استطاع ديكارت بدون أي حسابات كميـة، أن يعرف الصلة بين الألوان التي نراها والحبيبات (الكريات) التخيليـة التـي تقـوم بالدوران وهل هذا شرح مُرضٍ؟ ولماذا يُقدر أنه يعرف جيدا كيفية تولـد الألـوان فقط في إطار نموذجه الميكانيكي وأن اللون الأحمر مصاحب لكرية تـدور بقـوة كبيرة وأن اللون الأزرق يصاحبه كرية تدور بأقل قوة؟

ولأن أعماله ليس لها أساس كمي، نعتبر أن هذه العلاقات التي تصل سرعة الدوران أو القابلية للدوران بالألوان، لابد وأن تكون اختيارية، ومتـأثرة بالأفكـار التقليدية لأرسطوطاليس الذي يصل القوة برونق اللـون الأحمـر، والـضعف أو

نقصان القوة باللون الأزرق. إنه التوافق بين شدة المنظور الحدثى (اللــون الأحمــر برونقه يؤثر علينا أكثر من الأزرق) والانجذاب نحو حركة الدوران التى تعطى لهذا التفسير (فى عيون ديكارت) كل جاذبيته وشرعيته. وبعد بضع سنوات مــن أعمــال ديكارت، تخيل هوك فى ١٦٦٤ فى كتابه الصورة المجهرية (المصغرة)، أنــه فــى أثناء الحيود، يظهر انحراف فى الجزء الخاص بالدفعة، التى تكون بدورها عموديــة على اتجاه انتشار الضوء (لم يظهر مفهوم واجهة الموجة إلا فيمــا بعــد علــى يــد هايجنز سنة ١٦٩٠)، هذا الحيود ساعد هوك فى شرح تولد الألوان عند اعتبــاره أن أحد حدود الدفعة المائلة ضعيف فى جهة عن الأخرى وهكذا تتولد الألوان المختلفة.

وانتشر هذا الإطار الشرحى الميكانيكى الذى أُسِّسَ منْطِقَهُ علــى اعتبــارات حديثة بين معاصرى نيوتن. وهكذا شكلوا القالب الذى نبتت فيــه هــذه الأبحــاث الأساسية.

لقد بدأها سنة ١٦٦٤، بأبحاث نلقبهــا الآن بــالتقزح Iridiscence، والتــى استلهمها من فكرة تولد الألوان من امتزاج الضوء والظلام وبسبب ذلك نرى فــى المنشور شريطين متجاورين أحدهما واضح والآخر داكن وهكذا نصل إلى مختلف الألوان فى منطقة الالتقاء. ثم استخدم نيوتن فيما بعد مفهومًــا جــسيميًا للــضوء، واستطاع سنة ١٦٦٥ التوصل إلى تفسير يصل نموذجًا غيــر متجــانس للــضوء الأبيض (الجسيمات التى تشكل الأشعة الساقطة تملك سرعات أو كتــل لهــا قــيم مختلفة) بنظرية ميكانيكا تولد الألوان التى تعتبر امتدادًا للنسخة الميكانيكية التقليدية. وحتى هذا التاريخ، كان وضع نيوتن غاية فى الكلاسيكية، من وجهة نظــر تولــد الألوان. واقتصرت أعماله منذ خريف ١٦٦٥ كمعاصريه على تقطيع الزجاج فــى أشكال غير كروية لحل المشكلة الدقيقة لعدم لونية العدسات: كان التصور فى ذلــك الوقت أنه إذا حصلنا على أشكال للزجاج غير كروية نستطيع حل هذه المسألة.

وفى بداية ١٦٦٦ كان بحوزة نيوتن أساسيات نظريته. ففى خلال هذه المدة تولدت فرضيته الواضحة: لا يوجد سطح له سرعة تأثر تسمح لكل الأشعة بالتجمع

فى البؤرة، أى أنه لا يوجد سطح من هذه النوعية إذا كان الضوء عبارة عن خليط غير متجانس من الأشعة المختلفة الانكسار، هذه الفرضية الجديدة، ستهيئ لنيوتن المرشد الخاص الذى يفتح له الطريق أمام دراسات مجددة لظواهر الضوء والألوان.

أعاد نيوتن التجارب التى قام بها بويل فى كتابه. وكانت كتاباته عن النتائج المعملية ومقارنة نتائجه بنتائج بويل (الذى قام بالتجارب نفسها) مفيدة جدًا. بويل الذى أشار إلى أن ورقة ذهبية دقيقة جدا تظهر على أنها "مليئة بالمسام"، ويشرح هكذا التغير فى الألوان بعد بث الضوء: "ولكن الضوء الذى عبر هذه المسام تأثرا بالظلال وعُدّل حتى لا تستطيع العين أن تميز لونه أو كأنه لون ما بين الأخضر والأزرق". ولكن نيوتن كتب الآتى: "الأشعة المنعكسة من ورقة الذهب صفراء ولكن التى تبث زرقاء وهذا ما نراه عندما نمسك بالورقة فى يدنا بين عيوننا وشمعة". المقارنة الموضوعية، تشير إلى اختلاف جذرى فى رؤية عالمين للظاهرة نفسها. إذا كان نيوتن يرى الأشعة المنعكسة صفراء والأشعة المنبعثة زرقاء وبويل يرى أن الضوء المنبعث وليس الأشعة هى التى لها طبيعة معينة، ولكن الضوء الأبيض عدل وأثر على طبيعته خليط من الظلال. فى الواقع لا يرى نيوتن وبويل الأشياء نفسها عند رؤيتهم للورقة الذهبية. هذه الملاحظة من الممكن زيادتها، فمن خلال شرح النتائج الأساسية لأعماله على المنشور انفصل نيوتن تماما عن التحليلات الكلاسيكية. وفى سنة ١٦٦٦ جدد نيوتن فى تجربة المنشور بالكامل، مخالفا لمعاصريه، قام بالتجربة فى مكان مظلم، واستخدم فتحة متغيرة الاتساع للحد من الشعاع الساقط من ضوء الشمس، ووضع المنشور فى اتجاه زاوية الانحراف الأدنى، ووضع الحائل على مسافة كبيرة من المنشور، ثم رصد بقعة الطيف بوضوح جدا. وهناك شروط تجريبية بعيدة عن معاصريه ودقيقة، مما يشير إلى تفرد نظرة نيوتن عن التجربة التى أصبحت الآن نظرتنا. تجربة المنشور بالمعنى النيوتونى هى تجربة مبنية وليست معطاة. لقد فتحت رؤية نيوتن عن الألوان والضوء رؤيتنا.

وفى سنة ١٦٧٢، أصبح نيوتن عضوا فى الجمعية العلمية الملكية بسبب ابتكاره التليسكوب العاكس. لقد أدرك الآن أن طريقة قطع الزجاج لا تغير من مشكلة لالونية العدسات كما ذكر فى رسالته الشهيرة لهنرى أولدنبرج سكرتير الجمعية الملكية. هذه الرسالة قدمت إلى الأعضاء فى جلسة ٨ فبراير ١٦٧٢ وتم نشرها برقم ٨٠ يوم ١٩ فبراير بعنوان "مداولات فلسفية" Philosophical Transaction تشكل الكتابات المؤسسة لنظرية نيوتن عن الضوء والألوان. وبقى هذا الكتاب حتى نشر كتاب "البصريات" L'opticks سنة ١٧٠٤ العرض الأوحد لأفكاره.

ودون الدخول فى تفاصيل هذه الرسالة، التى تعيد صياغة أسلوب بيكون الذى يفضله أعضاء الجمعية الملكية، أعاد نيوتن صياغة نظريته إلى صورة نهائية مرتكزا على التجارب القاطعة التى أجراها. وهذه الرسالة المصاحبة لنشر "التجارب القاطعة"Experimentum Crucis ساعدت بشدة على خلق صورة لنيوتن وكأن نتائجه التجريبية عبارة عن قراءة لأسرار الطبيعة.

وفى هذا الكتاب، استخدم نيوتن منشورين وحائلين مثقوبين، المنشور الأول موضوع بالقرب من الثقب الموجود بجانب الفتحة المتغيرة. تخرج الأشعة من هذا المنشور لتكون الطيف، وتمر بثقب آخر فى الحائل الأول المثقوب، والموضوع بالضبط بعد المنشور. وعلى بعد ١٢ قدمًا من الأخير، وضع نيوتن الحائل المثقوب الثانى يلحقه المنشور. وهكذا يصل إليه الأشعة الخارجة من أول منشور وبإدارة المنشور الأول حول محوره، دون تغيير أماكن الحائلين والمنشور الثانى، تصل الأشعة بجميع أنواعها إلى الثقب الأول. وهكذا نعلم أن الشعاع الذى يصل الثقبين وحيث الاتجاه ثابت، يسقط على المنشور الثانى (كل الأشعة تسقط فى المكان نفسه بالنسبة للمنشور الثانى). وبهذه الطريقة استطاع نيوتن أن يحصل على بقعة ملونة على الحائط تمثل مختلف الأشعة المنكسرة من خلال المنشور الثانى، ويستنتج حينئذ أن الأكثر انكسارا (أو الأقل انكسارا) عن طريق المنشور الأول هو أيضا الأكثر انكسارًا (أو الأقل انكسارا) فى المنشور الثانى. وننقل عنه: "ورأيت فى

مختلف المواقع لهذه الأشعة، أن الضوء المائل نحو هذا الحد من الصورة التي حدث لها انكسار عن طريق المنشور الأول، قامت أيضا بعد مرورها في المنشور الثاني بالانكسار بطريقة أكبر من الضوء الموجود بالحد الآخر.

وهنا، استنتج نيوتن أن الضوء الأبيض مكون من أشعة تتكسر بقيم مختلفة: "وطول هذه الصورة يرجع إلى أن الضوء يتكون من أشعة تتكسر بطريقة مختلفة وتبعا لدرجة انكسارها المنبعثة سقطت على الحائط في أماكن مختلفة".

وفي الجزء الثاني من رسالته لسنة ١٦٧٢، لاحظ نيوتن أن الأشعة التي تعبر المنشور الثاني تحتفظ بألوانها ودرجات انكسارها بكل لون يوجد درجة للانكسار، بطريقة يمكن من خلالها إيجاد علاقة بين اللون والانكسار. ونتيجة لاختلاف درجات انكسار الأشعة، تختلف الأشعة في طريقتها لتقديم الألوان. وهكذا ختم نيوتن حديثه "ليست الألوان مؤهلات للضوء مشتقة عن طريق الانكسار أو الانعكاس على الأجسام الطبيعية (كما نعتقد عموما)، ولكن صفات أصلية تتولد بطريقة مختلفة تبعاً للأشعة"، وبالطريقة نفسها درجات انكسارها. كما وضح نيوتن أنه لا يمكن تغيير لون أو درجة انكسار أي شعاع ، إما عن طريق الانكسار وإما الانعكاس وإما بأي طريقة استخدمها لدراستها. ولم يبق بعد ذلك إلا بعض "الطفرات الظاهرية للألوان التي تحدث عند خلط أشعة لها طبيعة مختلفة". في الواقع هناك نوعان من الألوان: "الألوان البسيطة والأولية من جهة، وخليطها من جهة أخرى". الألوان الأولية هي: "الأحمر، والأصفر، والأخضر، والأزرق، والبنفسجي مع البرتقالي، والنيلي، وهو تنوع ظهر لنا من التجربة ومن خلال الخلطات المختلفة، كان جليا أن التكوين الأبيض هو الأكثر إدهاشاً". إنه التكوين الأكثر تعقيدا لأننا عندما حللناه عن طريق المنشور أعطانا كل الألوان الموجودة بالطيف.

تخيل نيوتن تجربة يستطيع فيها تجميع كل الألوان الخارجة من المنشور لتحويلها مرة ثانية إلى اللون الأبيض ولهذا يضع عدسة مجمعة في مسار الأشعة الخارجة من المنشور ورصد أن الضوء المكون هو عبارة عن ضوء أبيض لا

يختلف على الإطلاق عن ضوء الشمس إلا عندما كان نقاء الزجاج الذى يستعمله غير كاف. وفى هذه الحالة عدل الزجاج غير النقى الألوان. وأكد نيوتن أن اللون الطبيعى للضوء هو الأبيض؛ لأن الضوء الأبيض عبارة عن شريك مركب للأشعة المكونة من كل الألوان التى ترمى كالسهام بطريقة غير مرتبة من النقاط المختلفة للأجسام المضيئة. وفى اقتراحه الأخير، أخذ مفهوم عدم التجانس شكله النهائى، وهكذا اكتسبت أعمال نيوتن قوتها. ولأن لكل لون توجد درجة انكسار محددة، فلابد أن الأشعة القادرة على توليد الإحساس بالألوان ممزوجة من قبل فى الضوء الأبيض بدون أن تفقد خصائصها، و'يقوم المنشور فقط بفصلها وتشتيتها تبعا لتباين انكسارها الذى يأخذ شكل المثلث وبترتيب منظم يبدأ من الأحمر القانى (الأقل انكسارًا) إلى البنفسجى (الأكثر انكسارًا).

وفى كتابه الصادر لسنة ١٦٧٢، كما فى كتابه "البصريات" الصادر لسنة ١٧٠٤، قدم نيوتن عددًا غير محدود من الأضواء المتجانسة وتسيطر سبع درجات أساسية. كل شعاع يتصف (ليس عن طريق انطباع حدثى) بدرجة انكسار، وعن طريق قياس درجات انكسار الأشعة الملونة نستطيع بناء مقياس كمى للأشعة الملونة (أى الأشعة التى تعطى الإحساس بهذا اللون أو ذاك) وهكذا نستطيع تحويل الظواهر اللونية إلى رياضيات. واستطاع نيوتن بهذه الطريقة شرح لماذا يظهر هذا اللون أو ذاك فى هذا المكان فى السماء إذا كان هناك قوس قزح مثلاً، ولكن على الجانب الآخر لا يقول لنا من خلال الإطار النظرى كيف يختلف الأحمر عن الأزرق فى طباعه أو مثلاً كيف نرى الألوان.

وبفضل هذا الجهد حصلنا على عمل واضح (ليس كما يريد نيوتن أن يقنعنا بعدم تجانس الضوء الأبيض) عن تعدد الأشعة التى تنكسر بطريقة مختلفة بحيث يوجد عند كل لوحة انكسار شعاع له لون معين، أو بطريقة أخرى، تعدد الأضواء المتجانسة أو "الأحادية اللون" (monochromatic). ما هى طبيعة هذا الواقع التعددى للأضواء المتجانسة؟

انطلاقا من هذا الواقع تم تفسير كل الظواهر المرتبطة بـالألوان والـضوء، ولهذا الواقع أهمية نظرية فريدة، حتى لو أنه نتيجة شبه فورية للتجربة فى نظر أى فيزيائى معاصر، لكنه نتيجة لانطباع بسيط تولد منذ ثلاثة قـرون مـن التجريـب والبحوث التى أزالت الأفكار التخيلية والحديثة من جهة، ومن جهة أخـرى فهـذا الواقع لم يظهر إلا عن طريق أعمال نيوتن التى هيأت لنا منظورًا لفهم حقيقـة لا نراها فوريا، حقيقة تعدد الأضواء المتجانسة.

وهكذا، تمت الخطوات التى من خلالها بُنى هذا الواقع الذى ليس له وجـود فى مستوى الأشياء ذات الطبيعة الفورية بطريقة المنطق حتى لـو كـان اللجـوء للتجربة ضروريا. وبسبب الواقع الذى يفرض رؤية تقليدية للنظريات آنذاك ، بـدل نيوتن الواقع العام (الذى سيصبح موضوع بحث لعلم تولد الألوان وظواهر الألوان) بآراء تتبع منه فقط.

ولقد أوضحنا من قبل، أن الأساسيات التى وضعها نيوتن لم تكن عن عـدم تجانس الضوء الأبيض. ويهمنا أن نرجع باختصار إلى هذه النقطة. مـن الممكـن اعتبار النتائج فى كتاب نيوتن نهائية لكنها ليست على الإطلاق قرارات واقعيـة لا تتغير، لأنها ترتكز على فكرة خاطئة تدعى أن كل نتيجة حسبت لكل شعاع منفصل تظل كما هى حتى بعد امتزاج كل هذه الأشعة. لماذا لا تتغير خـصائص الـضوء الأبيض عند حدوث الانكسار الأول بطريقة تجعله يكتسب خصائص لا تتغير عنـد حدوث انكسارات متتالية؟ أو بدقة أكثر: لماذا لم يولد الانكـسار الأول الأضـواء المتعددة الأحادية الألوان عند استخدام ضوء أبيض متجانس؟

واضح بالطبع أن هذا التساؤل استرشد بمفـاهيم متجانـسة عـن الـضوء الأبيض. هذه المفاهيم ليست من هذا المنظور غير متطابقة (متلائمة) مـع نتـائج تجارب نيوتن. ونمت ردود الأفعال العدائية ضد أفكار نيوتن من فرضياته عن علم البصريات للأوساط المختلفة والتى بينت عدم كفاية دراسات نيوتن عليها. فقط فـى القرن التاسع عشر استطاع جورج جوى، وبمساعدة آلية رياضية بالغـة الدقـة أن

يصل فى بحثه "نقض لكتاب نيوتن" إلى الإجابة عن الأسئلة المذكورة أعلاه. ومن الممكن فهم التفسير النيوتونى إذا وضعنا نفسنا كنيوتن فى إطار مفهوم جسيمى للضوء. وينصب دور المنشور فقط على فصل الجسيمات المختلفة التى تُكَون الضوء الساقط على سطحه. وهكذا تصبح التجارب القاطعة، ليست قاطعة إلا على حساب تقديم فرض إضافى لم يتطرق له نيوتن بوضوح، ويتصل بالخصائص الجسيمية للضوء. والتفسير الآخر الممكن يظهر من خلال النظرية الموجية للضوء. هذه النظرية وضعها جورج جوى Georges Gouy سنة ١٨٨٦ فى مذكرات عنوانها "عن الحركة الضوئية" المنشورة فى المجلة الفيزيائية النظرية (صفحة ٣٥٤-٣٦٢) ثم استرسل فيها بعناية ر. و. وود R. W. Wood فى كتابه البصريات الفيزيائية لسنة ١٩١٣ كذلك بى. فلورى P. Fleury وج. ب. ماتيو J. P. Mathieu سنة ١٩٧٠ فى مجلدهما الخامس عن "الفيزياء العامة والتجريبية".

"كل مركز منير فى جسم متوهج لابد له أن يبث قطارات منتهية من الموجات". وتسألنا من قبل هل لابد أن نعتبر الضوء الأبيض عبارة عن مزيج من كل قطارات الموجات أو نتيجة لتكوينها. ونعلم الآن أن السؤال مضلل، لأنه ليست هناك تجربة تمكننا من الاختيار بين المفهومين. فى الأول، قطارات الموجة توجد فى شعاع الضوء الأبيض. ويفصلها السبكتروسكوب Spectroscope (جهاز قياس الأطياف) وتصبح لديها القدرة على التداخل. وفى المفهوم الثانى التذبذبات العددية التى تبث من المصدر تتركب فى حركة ناشئة تنتشر على صورة قطار موجى قصير، لا يمثل بصفة دورية يكون نبضه طاقة مشعة.

ومن ثم، أصبحت القضايا النيوتونية لا تمثل إلا واحدًا من المفاهيم الممكنة للضوء الأبيض، ولكنها مختلفة لأنها تسمح بتبسيط دراسات الظواهر البصرية، وطبعت أعمال جويي صفة الأصولية على اختيار تفسيرات نيوتن.

هذه المناقشة المصاحبة للمفاهيم الفيزيائية التى وضعت عن الضوء الأبيض، تعيدنا طبيعيا إلى الجدال موجة أم جسيم.

موجات وجسيمات

بسرعة كبيرة خلال القرن السابع عشر، ظهر تياران كبيران انحاز لهما العلماء، فالبعض يعتبر الضوء مكونًا من جسيمات والبعض الآخر يرى أن الحركة تتم دون انتقال مادى. فى الحالة الأولى، تتركز نظريات البث (الانبعاث) وممثلها الأول نيوتن، وفى الحالة الثانية توجد نظريات الوسط وممثلها الأكبر كريستيان هايجن.

إسحق نيوتن ونظريات الانبعاث

من الواضح جليا، وبعد قراءات كثيرة لكتبه المنشورة أن الأفكار النيوتونية الحذرة جدا يتسلط عليها مفهوم أن الضوء مكون من جسيمات؛ ولهذا السبب كانت قيمة "التجارب القاطعة". فى الواقع لابد من تقديم فرض تكون الضوء من الجسيمات حتى نستطيع استنتاج تعددية الأضواء المتجانسة بعد مرورها من المنشور الأول وليس استنتاج عدم تماثل الضوء الأبيض.

فالمصادر الضوئية، تبعا لنيوتن، كالشمس تبث جسيمات تنتشر بسرعة من الفضاء إلى عيوننا. هذه النظرية تسمح بشرح (كما يبين نيوتن فى الفصل الرابع عشر من الكتاب الأول عن "الفلسفة الطبيعية للمبادئ الرياضية" فى لندن سنة ١٦٨٧) الانتشار الخطى، والانكسار، والانعكاس، والسرعة المنتهية للضوء بسهولة. ولكنها تظل غير صالحة للظواهر الأخرى، بالذات عند ظهور خصائص دورية.

وكما فى حالة الشرائح الرفيعة، يتخيل نيوتن نظريته كوسيلة تعيد تقديم مفهوم تفاعل الوسط مع الأشعة أو فى مخيلة لا ترى غير الجسيمات، صفات جديدة ذاتية للشعاع، كما تشهد لتفسيره ظاهرة الانعكاس الجزئى الذى له دور مهم فى دراسة ظواهر التداخل. فى الواقع كيف يستطيع نيوتن أن يفسر أن الأشعة ستبث أو ستنعكس عند التقائها بسطح يسبب الانكسار؟ الإجابة تكمن فى الاقتراح الثامن

عشر من الجزء الثالث لكتابه الثانى عن البصريات (ترجمة جون بول مارات Jean-Paul Marat: "السبب الذى من أجله تعكس أسطح الأجسام الشفافة السميكة جزءًا من الضوء الساقط عليها، هو أنه فى لحظة سقوطها، تتواجد هذه الأشعة فى مداخل لانكسار سهل والأخرى تجد نفسها فى مداخل لإرسال (...) والضوء له مداخل لانكسار سهل وإرسال سهل، قبل أن يسقط على الأجسام الشفافة : وعلينا أن نظن أن هذه المداخل تصاحب الضوء عندما يبدأ فى بث أجسام منيرة، وأن الضوء يحتفظ بهذه المداخل على طول مساره.

إذن على حد قول نيوتن يوجد احتمال أن هذه المداخل تخص ("ينبغى لنا أن نظن"..) الأشعة المختلفة منذ البداية بحيث إنها عند التقائها بسطح الانكسار تتكسر تلك التى تتواجد فى مدخل سهل للانكسار (الانكسار الجزئى) وتلك التى تتواجد في مدخل سهل للإرسال ترسل بطريقة تولد مثلا حلقات ملونة. إذا وظيفة سطح الانكسار ليست تكوين المداخل السهلة للإرسال ولكن انتقاء الأشعة التى فى حالة إرسال سهل من بين التى تصله. ومن وجهة النظر هذه، يلعب السطح دور المحلل (كالمنشور والضوء الأبيض)، وكل شعاع له يتواجد فى هذه الحالة أو تلك. وهكذا نرى النمط الخاص بالادعاءات لنيوتن من خلال هذا الشرح للظاهرة. يصبح هذا التفسير لظاهرة الحيود التى يلقبها نيوتن بظاهرة الانحناء غاية فى الهشاشة فى إطار نظريات الانبعاث. على عكس جريمالدى وهوك لم يقدم نيوتن عن طريق هذا الأسلوب التجريبى فكرة لنمط خاص لانتشار الضوء. بالنسبة له تنتج هذه الظواهر من تعدد الانكسار الذى يحدث على طرف الحائل إما بسبب وجود وسط أثيرى له كثافة متغيرة يحيط بالحائل ويمر فى طرف الحائل الموضوع في مسار الضوء (رسالة من نيوتن إلى أولدنبرج Oldenburg يوم ٧ من ديسمبر ١٩٧٥)، وإما (كما فى المبادئ) عن طريق إدخال أثر الانجذاب للأجسام التى احتكت بالجسيمات المكونة للأشعة: "والأشعة عند مرورها بالقرب من زوايا أجسام مظلمة أو شفافة كطرف شفرة السكين، أو قطعة نقدية، أو زجاج، أو حجر... إلخ تنحنى نحو هذه الأجسام كما لو كانت تجتذبها: وهذا ما اكتشفه جريمالدى منذ أمد عندما أدخل

شعاع ضوئى من خلال ثقب فى حجرة مظلمة وهذا ما تحققت منه (الكتاب I ، الفصل الرابع عشر).

وحقق نيوتن فى خلال الأعوام ١٦٩٠ مشاهدات مهمة دون أن يشير إلى وجود أهداب بداخل الظل، عندما قدم نتائجه عن الحيود والميل فى الجزء الثالث من البصريات.

كريستيان هايجن والمفاهيم الموجية

عكس النظرية النيوتونية، تصنيف نظرية هايجن فى إطار نظريات الوسط. ومن خلال شرحه الدقيق لنمط انتشار الضوء، حدد هايجن المفاهيم الهندسية القديمة للأشعة وتعدى ببراعة الأعمال الأولية لتوماس هوبز Thomas Hobbes (١٥٨٨-١٦٧٩) وروبرت هوك Robert Hooke (١٦٣٥-١٧٠٣) وإسحق بارو (١٦٣٠-١٦٧٧) أو إجناس جاستون بارديز Ignace - Gaston Pardies فى الواقع، فى كتاب "نبذة عن الضوء" (ليد Leyde ١٦٩٠) والذى بدأت قراءته منذ ١٦٧٧-١٦٧٨، قارن هايجنز الضوء بالصوت، ونتيجة لذلك مثل الضوء كانتشار لذبذبة طولية، موازية للشعاع، من خلال وسط أو مادة أثيرية. وساق تحليل الحركة التى تحدث فى الوسط الأثيرى هايجن إلى أن يعتبر كل النقاط الموجودة فى موجة (لم يتحدث لدورتها) من الممكن أن تصبح هى نفسها نقاطًا للانتشار وإطارها يمثل سطحًا جديدًا للموجة قابلاً للانتشار لانهائيا: "لا بُدَّ لنا أن نأخذ فى الاعتبار عند انبعاث هذه الموجات أن كل جسيم للمادة التى تمر فيها الموجة، لا ينبغى له أن يوصل حركته فقط بالجسيم القادم والموجود فى الخط المستقيم الخارج من النقطة المنيرة ولكن أن يعطيها للجسيمات الأخرى التى تلمسه وتعترض حركته (نبذة عن الضوء).

وهكذا أطلق هايجنز الإطار العام لمبدأ "هايجنز- فرنل" أو مفهوم مظروف (إطار) الموجات للموجات الأولية، هذا المفهوم له أهمية فى بناء بصريات فرنل

وفى فهم ظواهر الحيود فى القرن التاسع عشر، عندما تطور التحليـل الرياضـى ومكننا فى النهاية من استخدام هذا المبدأ بطريقة مناسبة. فى الواقع النموذج الـذى قدمه هايجنز يجعل من الصعب تفسير الانتشار الخطى إذا لم نمتلك مدارك ومفاهيم رياضية وافية. أما نيوتن فى الفصل الثامن من كتابه "المبادئ" الملقب بـ "انتـشار الحركة فى السوائل" أشار إلى الصعوبة المرتبطة بسريان الحركة بداخل الـسوائل أو بدقة أكثر عندما يعمل السائل على مساندة بث الحركة. وكان عنـوان اقتراحـه الـ XLII موضحًا لهذا: "كل الحركة المنتشرة فى سائل تبتعد عن الخط المـستقيم فى فضاءات متحركة".

ويرتكز هايجنز دائما على نموذجه النظرى حتى عندما يـشرح الانكـسار. وخلافا لنيوتن والمتمسـكين بنظريات البث، اقتيد إلـى أن يوضـح، ببيرفرمـات Pierre Fermat أن الضوء فى إطار نظريته ينتشر فى الهواء مـثلا أسـرع مـن الزجاج.

ويستفاد من النتائج المتناقضة بين نظريات الانبعاث ونظريات الوسـط فـى بداية القرن التاسـع عشـر بلفظ الانبعـاث بعـد تجـارب هيبوليـت فيـزوا Hippolyte Fizeau (١٨١٩-١٨٩٦) وليون فولكـوا Leon Foucault (١٨١٩-١٨٦٨)؛ ففى مفاهيم الانكسار لهايجنز وبالتناقض مع أساليب هـوك فـى كتابـه الصورة المصغرة Micrographia تظل واجهة الموجـة عموديـة علـى اتجـاه الانتشار.

وكرس هايجنز الباب الخامس من كتابه لدراسة مستفيضة وغاية فى الأناقة، لظاهرة الانكسار المزدوج لبلورة الكالسيت. وعند هـذا الحـد، اعتقـد أن هنـاك موجتين تنتشران بسرعات مختلفة بداخل البللورة الأولى، عادية كانت أو كرويـة، والثانية، فوق عادية أو (بيضاوية الدورة). ويبـين أن الـشكل المجـزء بانتظـام للأجزاء المكونة للبلـورة (شـكل رومبوهيـدريك Rhomboedrique) يـسمح بمضاعفة السرعة بداخل البللورة وحيود الموجتين، بالتطابق مع ملاحظات إيرازم بارتولين Erasme Bartholin.

وفى نهاية تحليله عن الانكسار المزدوج، لاحظ هايجنز (دون أن يفسر)، أن الشعاعين الخارجين من البللورة لم يعد لهما السلوك نفسه نسبيا بالنسبة للبللورة الثانية. وتبعا للتوجهات المتوالية للبلورتين، يختلف عدد الأشعة الخارجة من البلورتين وتختلف شدتها.

ومع أن نيوتن لم يستخدم هذه البلورة فى كتابه عن البصريات لكنه كرس دراسته فى كتابه الثالث على هذه البللورة. يتضح الخلاف بين أسلوب البصريات النيوتونية وبين أسلوب البصريات الهايجنية. ويستنتج نيوتن أن: "كل شعاع ضوئى له جانبان متناقضان لهما صفات أساسية، يعتمد عليها الانكسار الاستثنائى وجانبان آخران ليس لهما هذه الصفات. وهكذا من الانكسار الجزئى إلى الانكسار المزدوج، تكتسب الأشعة المضيئة صفات جديدة باضطراد وتصبح أكثر تعقيدا".

وقام فى بداية القرن التاسع عشر إتيان لويس مالو Etienne Malu (١٧٧٥-١٨١٢) بتقديم (فى إطار نظريته ذات البناء الجسيمى) مفهوم الاستقطاب. هذه النظرية التى قام جون باتيست بيو (١٧٧٤-١٨٦٢) Jean-Baptiste Biot بتطويرها بعد عدة سنوات، حلت مكانها سريعا نظرية البصريات الموجية لفرنل التى ترتكز على فرضية أن التذبذبات الضوئية مستعرضة.

درس هايجنز وشرح جيدا ظواهر الانكسار المزدوج ولكنه ترك جانبا تحليل ظواهر الحيود والشرائح الرفيعة. ومن المثير للدهشة أن هذه الظواهر التى أصبحت فيما بعد محور اهتمام العلماء في القرن التاسع عشر لم يذكر عنها هايجنز شيئا في كتاباته. آثر هايجنز أن لا يقدم شيئًا على أن يفشل لأنه لا يستطيع أن يقدم تحليلا مترابطًا ومرضيًا فى إطار نظريته.

تخطى مفهوم ازدواجية الضوء:

فى القرن الثامن عشر سادت النظريات النيوتونية والجسيمية بعد تجارب فيزو وفولكو والأعمال العملاقة لأوجستين فرنل (١٧٨٨-١٨٢٧) ثم أصبح القرن

التاسع القرن الموجى، هذا الأخير ظهرت فيه فرضية الأثيــر لفرنــل للخــواص الميكانيكية التى يصعب التواصل معها، والتى استثمرت فيما بعد، بدءًا من ١٨٧٠ فى نظرية الكهرومغناطيسية لجيمس كليرك ماكــسويل James Clerk Maxwell (١٨٣١-١٨٧٩).

واستنتج ماكسويل مرتكزاً على معادلاته الشهيرة، أن فى حالة مرور إشارة كهرومغناطيسية متغيرة يمكن أن يصبح الوسط المكــون للمــادة العازلـــة مجــالاً لموجات مستعرضة سرعتها مثل سرعة الضوء. وهكذا يتقارب مفهوم الأثير لفرنل ومفهوم الأثير اللازم للأحداث الكهرومغناطيسية. وقام هذا التكامــل الــذى ضــم الضوء مع الظواهر الكهرومغناطيسية بتوجيه ماكسويل نحو مسألة الحركة النسبية للأرض والأثير.

سيطرت هذه المسألة على الأمــور ســنة ١٨٨٧ مــع التجربــة الــشهيرة لمايكلسون ومورلى Michelson and Morley. هذه التجربة قادت العلمــاء إلــى استنتاج أنه من المستحيل عن طريق تجربة فيزيائية أيًا كانت أن نرصــد حركــة الأرض بالنسبة للأثير.

وهكذا فُتحت الأبواب أمام نظريات آينشتين فى سنة ١٩٠٥، حين قام آلبرت آينــشتين Albert Einstein (١٨٧٩-١٩٥٥) بنــشر مُتلاحــق لمذكراتــه عــن كهرومغناطيسية الأجسام المتحركة التى وضعت أساسيات نظرية النــسبية والأثــر الكهروضوئي الذى قدم بدوره فرضية "الكم" الضوئى. أعادت هذه المذكرات إلــى الحياة التساؤلات عن الطبيعة الموجية الخالصة والمتصلة التى تم تبنيها فى القــرن التاسع عشر.

هذه الطبيعة المزدوجة للضوء التى حــاول لــويس دوبروجلــى (١٨٩٢-١٩٨٧) أن يفهمها ويفسرها فى كتابه "أبحاث على نظرية الكم" سنة ١٩٢٤. وعبر فى كتاباتها عن ازدواجية الضوء (جسيم - موجة) بأنها صــفات عامــة للأشــياء المجهرية وأن المادة مثلها مثل الضوء، لها صفات مزدوجة جــسيمية وموجيــة،

وسريعا حصلت هذه الدراسات على التأكيد بعد التجارب التى أجريت ولوحظ فيها حيود الإلكترونات (تجربة دافيسون جرمر فى ١٩٢٧، وجى. بى. طومسون فى ١٩٢٨ وروب فى السنة نفسها).

وعند تعميم المفهوم الموجى للمادة، استطاع إرفين شرودينجر Erwin Schrödinger (١٨٨٧-١٩٦٧) التوصل إلى المعادلة المعروفة لانتشار الموجة التى تمثل نظامًا كَميًّا معروفًا، مصاحبًا لمفهوم سعة الاحتمال التى تمثل الفوتون وليس الموجة أو الجسيم. وأخيرا تطورت الصياغة النظرية الأنيقة لنظرية الكم خلال الأعوام (١٩٢٥-١٩٣٠) على يد كل من: بول ديراك (١٩٠٢-١٩٨٤) Paul Dirac، ونيلزبوهر (١٨٨٥-١٩٦٢) Niels Bohr، وفرنرهايزنبرج (١٩٠١-١٩٧٦) Werner Heisenberg. لقد وضعوا الإطار الذى من خلاله نستطيع اليوم دراسة الضوء.

المراجع:

– BLAY (M.), *La Conceptualisation newtonienne des phénomènes de la couleur*, Paris, Vrin, 1983.
– CROMBIE (A. C.), *Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science, 1100-1700*, Oxford, Clarendon Press, 1971 (première éd., 1953).

– HALL (A. R.), *All was Light. An Introduction to Newton's Optick*, Oxford, Clarendon Press, 1993.
– MAITTE (B.), *La Lumière*, Paris, Le Seuil, 1981.
– RONCHI (V.), *Histoire de la lumière*, Paris, A. Colin, 1956.
– RASHED (R.), *Géométrie et Dioptrique au xᵉ siècle. Ibn Sahl, Al-Qūhī et Ibn Al-Haytham*, Paris, Les Belles lettres, 1993.
– SABRA (A. I.), *Theories of Light from Descartes to Newton*, Cambridge University Press, 1981 (première éd. 1967).
– SIMON (G.), *Le Regard, l'être et l'apparence dans l'optique de l'Antiquité*, Paris, Le Seuil, 1988.

أنواع الليزر[١٠٦]

بقلم: إليزابيث جياكوبينو
Elisabeth GIACOBINO

ترجمة: د. هدى أبو شادى

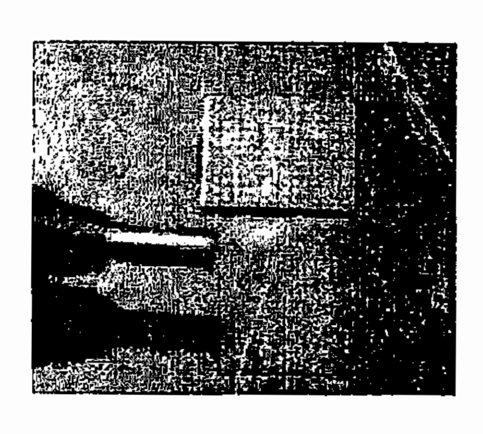
ظل الليزر منذ اختراعه منذ ما يقرب من أربعين عاما، أداة غامضة كالأسطورة، وذاعت شهرته بين العامة من خلال فيلم "حرب الكواكب" عند استخدامه فى القتال كسيف الليزر" أو "كشعاع الليزر القاتل" عُرف أكثر من استخداماته الأخرى، الأكثر واقعية والتى أثرت فى حياتنا. عندما تمسك الناس بالتليفون للحديث مع أحد من الأقارب فى مكالمة فورية، هناك احتمال كبير أن تكون المحادثة بثت عن طريق الليزر، لأن الكابلات التليفونية الآن أصبحت تستبدل بالألياف الضوئية التى يمر بها ضوء الليزر. ودون الاتصالات عن بعد بالليزر، القادرة على نقل كمية هائلة من المعلومات، لن يكون ممكنا أن نتوسع فى استخدام الإنترنت.

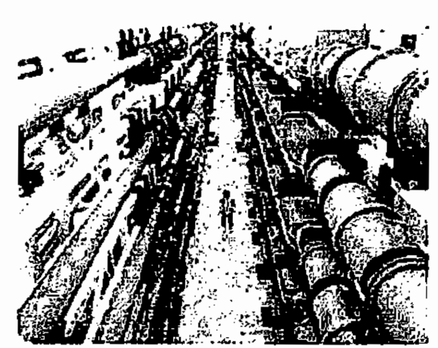
ومنذ عمل أول ليزر، الليزر الأحمر باستخدام الياقوت الأحمر "الروبى"، سنة ١٩٦٠، ازدادت أنواع الليزر من حيث اللون والحجم والشدة. الليزر الأكثر صغرا، غاية فى الدقة ولابد من رؤيته تحت الميكروسكوب، والأكثر كبرا تستخدم طاقة كهربية لمدينة متوسطة، وتحتاج إلى أبنية خاصة لحفظها (الرسم ١). وطولها الموجى يتعدى بكثير ألوان الطيف المرئية التى تمتد من الأشعة السينية حتى الأشعة تحت الحمراء.

ولكل أنواع الليزر صفة مشتركة ألا وهى بث أشعة غاية فى التوازى ولها لون نقى. من أين يأتى هذا الضوء غير العادى، الذى لا نعرف هويته والمختلف عن الضوء الكلاسيكى التى تبثه المصابيح الكهربية؟

---

(١٠٦) نص المحاضرة رقم ٢١٦ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٣ أغسطس ٢٠٠٠.





الشكل (١)

توجد أنواع عديدة من الليزر

- بالأعلى صورة ليزر مجهرى من المواد شبه الموصلة

- بالأسفل صورة لليزر المستخدم فى الانصهار الذرى

الانبعاث المستحث، قاعدة بناء الليزر

كما فى المصباح الكهربى أو الأنبوبة الفلورسنت، ينتج الضوء من خلال ذرات أو جزيئات. تكتسب الإلكترونات طاقة عندما تتعرض ذراتها إلى الحرارة، أو عندما تستثار بتيار كهربى أو عند امتصاصها للضوء، ولكنها لا تستطيع أن تحتفظ بالطاقة إلا بطريقة محددة جدًا.

وكما بَيَّن نيلزبوهر Niels Bohr سنة ١٩١٣، أن الذرات لها مستويات طاقة محددة جدا، يُطلق عليها مُكماة، تستطيع أن تنتقل بينها. وهكذا تمتص الذرة أو تبث جسيمًا ضوئيا يسمى الفوتون، وكانت الفروض التى قام بها ماكس بلانك Max Planck سنة ١٩٥٥سببا لظهوره وأكدها آينشتين سنة ١٩٠٥، انظر (الرسم ٢). ومثل مستويات طاقة الذرة، فإن طاقة الفوتون يتم تبادلها ومن ثم يتحدد طولها الموجى ولونها الذى ينتج من خلال الذرة أو الجزىء المستخدم.

فى المصابيح العادية، نمد الذرات بالطاقة عن طريق التيار الكهربى، أى نضع عددًا لا بأس به من إلكتروناتها فى مستويات طاقة أعلى أو مستثارة. وترجع هذه الإلكترونات إلى المستوى الأرضى بطريقة تلقائية وغير مرتبة، فى كل الاتجاهات وعلى عدة أطوال موجية.

وإلى جانب هذا الانبعاث التلقائى، يوجد نمط آخر، اكتشفه آينشتين سنة ١٩١٧، ولقبه بالانبعاث المستحث وهو أساس عمل الليزر. الليزر هو اختصار لكلمة تكبير الضوء عن طريق الانبعاث المستحث للأشعة

(Light amplification by stimulated emission of radiation)

يجبر الضوء الذرة على العودة إلى حالتها الأرضية من الحالة المستحثة عن طريق إطلاق طاقتها: يصطدم فوتون بذرة ويخرج فوتونين. والمثير هنا هو أن الضوء المنبعث قيمته مماثلة بالضبط للضوء الساقط؛ ويذهب الضوء فى الاتجاه نفسه، ويكون للموجتين الطور نفسه بالضبط. إذن ينتج الانبعاث المستحث أعدادًا من الفوتونات المتشابهة وتكبيرًا مترابطًا للموجة.



الشكل (٢)

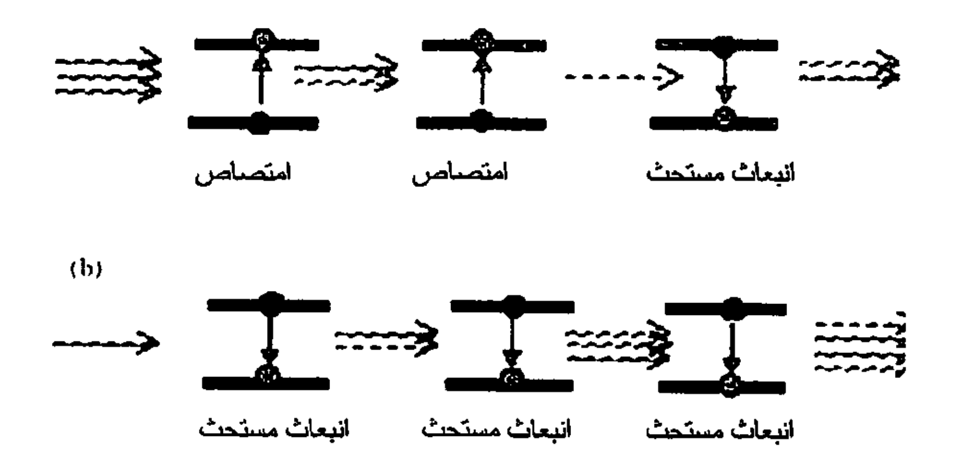
آينشتين بلانك بوهر

واقتُرحت فكرة الليزر فى سنة ١٩٥٨ على يد اثنين من الفيزيائيين الأمريكيين، سى. إتش. تاونس (C. H. Townes) وإى. إل. شاولو (A. L. Schawlow)، وتقريبا فى الوقت نفسه مع العلماء السوفييت فى. إى. فابريكان (V. A. Fabrikant)، إيه. إم. بروخوروف (A. M. Prokhorov) وإن. جى باسوف (N. G. Basov). وحصل كل من تاونس، باسوف وبروخاروف على جائزة نوبل سنة ١٩٦٤ عن هذا الاختراع.

وحصل عليها شاولو فيما بعد سنة ١٩٨١. وكان تاونس قد اخترع من قبل "الميزر" (Maser)، الليزر الذى يعمل بالموجة – الميكروية باستخدام الفكرة نفسها. وينبغى أن نلاحظ أن كل المبادئ وضعت منذ ١٩٢٠. فهل كان من الممكن اختراع الليزر قبل ذلك الوقت؟

المشكلة الرئيسية تكمن فى أن الانبعاث المستحث كان فى حالة صراع مع الأنواع الأخرى لتفاعل الضوء مع الذرة، أحد هذه التفاعلات هو الانبعاث التلقائى الذى ذكرناه من قبل، والآخر هو الامتصاص الذى من خلاله يختفى فوتون موجود عن طريق امتصاص الذرة له وانتقالها إلى مستوى طاقة أعلى. وكما فى الامتصاص فإن الانبعاث المستحث يحدث عندما تماثل طاقة الفوتون بالضبط الطاقة التى تحتاجها الذرة للانتقال بين مستويين للطاقة. هذان الحدثان لهما الاحتمال نفسه والنوع الذى يهيمن يُنتج بفضل نوعية تحضير الذرات بين مستويى الطاقة المرادة للانتقال.

ولنتصور كما فى الرسم (١)، سقوط مجموعة من الفوتونات على مجموعة من الذرات. فإذا كانت أغلبية الذرات موجودة فى المستوى الأدنى للانتقال، يحدث امتصاص أكثر من الانبعاث المستحث ويقل عدد الفوتونات. والعكس يحدث إذا كانت أغلبية الذرات موجودة فى المستوى الأعلى فإن الانبعاث المستحث ينتج بكمية أكبر ويخرج عدد كبير من الفوتونات أكثر من العدد الأوَّلى (الرسم ٣). وعندما يزداد عدد الفوتونات كثيرا، يصبح الانبعاث المستحث أكثر حدوثا من الانبعاث التلقائى.



الشكل (٣)

السباق بين الامتصاص والانبعاث المستحث

أ- يقل الضوء عند تواجد الذرة فى مستوى طاقة منخفض

ب- يحدث تكبير فى الاتجاه المعاكس

فى الغالب، تكون الذرات فى مستويات منخفضة للطاقة وكلما علا مستوى الطاقة قلت الأعداد ولكى نشغل الليزر، لابد أن نضع الذرات أو الجزيئات فى ظروف غير طبيعية، بحيث تنقلب الحالة المذكورة أعلاه. أى أن عدد ساكنى مستوى الطاقة الأعلى أكبر من ساكنى مستوى الطاقة الأدنى. وهكذا يصبح الانبعاث المستحث الحدث المسيطر.

هذه الحالة من الصعب تحقيقها، واستعان العلماء بالدراسات التى تمت باستخدام أجهزة القياس الطيفى على عدة مواد مثل الغازات والسوائل والمواد الصلبة لتحديد أيها له الخصائص الأفضل لاستخدامها. فى بعض أنواع الليزر يستخدم التيار الكهربى لتحفيز الذرات على الانتقال إلى مستويات طاقة أعلى وتحضيرها للانبعاث المستحث. وفى أنواع أخرى يوجد مصدر ثانوى للضوء (مصباح أو جهاز آخر لليزر) لضخ الذرات نحو مستوى طاقة أعلى. وكأن

أول من اقترح فكــرة الضـــخ الضوئى هو الفيزيائى الفرنـــسى ألفــرد كاســتلر (Alfred Kastler) والذى حصل بفضله على جائزة نوبل سنة ١٩٦٦.

وإذا لم يكن التكبير الذى يحدث بعد المرور فى المادة كافيًــا، نــستطيع أن نقويه عن طريق إعادة تمرير الموجة بداخل الوسط بواسطة مرآة، ومــن الممكــن تكرار ذلك مرات عديدة عن طريق استخدام مرآتين، تقع كل واحدة فى جانب، مع كل مرور تكتسب الموجة الضوئية ربحا فى الطاقة يعتمد على عدد الذرات التى تم ضخها إلى مستوى أعلى. ويمكننا أن نتخيل أن الموجة تتضاعف لا نهائيا لكن هذا التخيل غير صحيح. عند كل مرور، تعانى الموجة خسارة فى الطاقة، خــسارة لا يمكن تفاديها بسبب الامتصاص المتبقى فى الوسط ومن المواد الأخرى التى تكــون الليزر وخصوصا الخسارة من خلال المرايا التى تبنى شعاع الليزر الخــارج مــن الجهاز. تكبر الموجة إلى أن يعادل الربح الخسارة ويفوقها ويستقر نظــام الليــزر الناشئ فى الفجوة الموجودة بين المرآتين. وتعتمد شدة شعاع الليزر الخــارج مــن الفجوة على الربح المتبقى بداخل الوسط المادى وشفافية (نقاء) المرايا فى الوقــت نفسه. ويصبح الشعاع متوازيًا ومباشرًا كلما زادت المسارات التى قــام بهــا بــين المرآتين بداخل الفجوة.

ليزر من جميع الأصناف

عقب نشر كل من تاونس وشاولو أفكارهما، ظهرت منافسة عنيفة فى العالم أجمع لتحقيق هذا الحدث الجديد معمليا. وبعد ظهور ليزر الياقوت الأحمــر الــذى ابتكره تى. مايمن (T. Maiman) فى يوليو سنة ١٩٦٠، بدأ العمل بنوعين آخرين من الليزر فى السنة نفسها فى الولايات المتحدة. واحد منهم هو ليزر الهيليوم نيون، ذو الشعاع الأحمر المستخدم فى المحاذاة والإشارة. هذا النوع تــم تبديلــه بليــزر المواد شبه الموصلة، الذى بدأ عمله أول مرة سنة ١٩٦٢. ويستخدم ليزر المــواد شبه الموصلة فى شبكات الاتصال الضوئى. وفى بداية الستينات من القرن الماضى

ظهرت أنواع أخرى من الليزر، كليزر النيوديم فى مجال الموجات تحت الحمراء، والمستخدم إلى الآن لتكوين أشعة ذات شدة فائقة، ولليزر الأرجون المؤين الأخضر والذى يستخدمه أطباء العيون لترقيع القرنية أو ليزر الغاز الكربونى، فـــى مجـــال الموجات تحت الحمراء، المستخدم فى علاج وتقطيع الأسطح فى الميتالورجيا.

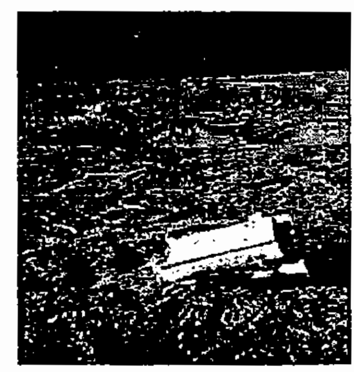
وبعد قطع هذه المسارات العديدة قبل أن يخرج، يصبح شعاع الليزر متوازيًا وغاية فى التركيز على مساحة صغيرة جدا، مما يسمح بالوصول إلى شدة ضوئية غاية فى الكبر. ولأن الليزر ينتج من تعدد الفوتونات المتماثلة، عمليا يعتبر ضووء موجة أحادية اللون، لها لون غاية فى النقاء. ويوجد أيضا نمط آخر للتشغيل، فـــى هذا النمط تتكثف كل طاقة الليزر فى سلسلة من الومضات غايـــة فـــى القـــصر. والقياس المسجل لأقصر مدة فى حدود الفيمتوثانية، أى واحد على مليون مليار من الثانية. وأثناء هذا الزمن القصير تنضغط كل شدة الليزر، شدة قد تصل إلى تيـــرا واط 100 terawatts أو 100000 مليار من الواط أو ما يـــوازى عمـــل 100000 محطة توليد كهرباء. ونعلم أن هذه الومضات لا تبقى وقتا يذكر ! فـــى الواقـــع إذا استمرت هذه الومضة لمدة ١٠ فيمتوثانية، لن تحتوى على أكثر مـــن ١ جـــول أو ١/٤ كالورى أى طاقة متواضعة.

تطبيقات متنوعة

بسبب الخصائص الرائعة لليزر، يتم استغلاله فى مجالات عديدة متنوعـــة. والشعاع المنبعث المتوازى يستخدم فى قراءة أقراص الليزر المدمجـــة وللإشـــارة وأخذ القياسات التوبوجرافية ولإرشاد المروحيات والصواريخ. وعندما يبث الليزر ومضات قصيرة، من الممكن استخدامه لقياس المسافات التى تفصل بينه وبين جسم بعيد: يكفى أن يكون الأخير عاكسا.

نستطيع هكذا أن نقيس زمن الذهاب والعودة لومضة بين الليـــزر والجـــسم، وتنتشر الومضة بسرعة تعادل سرعة الـــضوء حـــوالى 300000 km/sec وفـــى

المستقبل ستزود العربات بأشعة ليزر تبث لتبين المسافة بينها وبين العربة القريبة منها، حتى تبقيها على مسافة ثابتة.





الشكل (٤)

قياس المسافة بين الأرض والقمر عن طريق إرسال شعاع من المرصد إلى سطح القمر ويرتد الشعاع عند ملاقاته عاكسا موجوذا على سطح القمر.

وفى إطار الاختراع، جهاز ليزر يسمى البروفيلومتر (Profilometre) يسمح لغير المبصرين باكتشاف العوائق القابعة فى طريقهم ومحيطهم بطريقة أفضل من العصا البيضاء بالتأكيد. ونحقق هدفًا آخر، هو قياس المسافة بين الأرض والقمر: عدة مراصد مثل الموجودة فى الكوت دازورفى جراس، يمتلك "ليزر" موجهًا إلى القمر. وينعكس الشعاع عن طريق عاكسات الضوء التى وضعت على سطح القمر أثناء بعثة أبوللو. ويرتد الشعاع بعد أن يضعف جدا، ولكن يظل من السهل رصده على الأرض (الرسم ٤). وهكذا نعلم أن القمر يبتعد عن الأرض 3.8cm فى السنة! والأبحاث التى تقوم بدراسة موجات الجاذبية التى تنبأ بها آينشتين سنة ١٩١٨، والتى لم ترصد أبدا تستخدم أيضا الليزر. موجة الجاذبية التى تمر على الأرض تعدل طفيفا الأطوال. ويساعد الليزر أيضا على مقارنة طول ذراعين لجهاز بدقة فائقة يلقب بالأنترفيرومتر Interferometer حيث

يمر فيه شعاع الليزر. ونتمنى أن نصل إلى قياس تغييرات فى أطوال أقـــل بكثيـــر من نصف قطر النواة على بعد عدة كيلو مترات.

وتستفيد الاتصالات البصرية عن بعد أيضا من هذه الإمكانية الموجودة فـــى الليزر، والتى تنتج أشعة غاية فى الدقة قابلة للتحول إلى ومضات غاية فى القصر. وتم إحلال الكابلات الضوئية مكان الكابلات النحاسية لتمتد تحت المحيطـــات كمـــا تمتد فى القارات. ويوجد بداخل هذه الكابلات، ألياف بصرية، وهى شعيرات رقيقة من الزجاج، ترشد أشعة الليزر إلى طريقها من المرسل إلى المستقبل. وعلى هـــذا النوع من الليزر تسجل المحادثات التليفونية والمعلومات (المعطيات) على الإنترنت فى صورة كود رقمى مختلف لكل منهما. وتصل الكابلات الحديثـــة التـــى تقطـــع المحيطات إلى قوة سعة رائعة تكافئ عدة ملايين من الاتصالات التليفونية. وعـــن طريق ابتكار أنواع جديدة من الكابلات التى تستخدم الليزر ونظم ضوئية أفضل فى عملها سنسمح للنسيج العالمى بمزيد من التقدم بنمط أكثر سرعة.

وبعد تركيز شعاع الليزر، يصبح لشعاع الليزر طاقة كبيرة مركزة. وهذا ما تفعله طابعات الليزر مع شدة متواضعة نسبيًا. وتؤهل قدرة بعض أنواع الليزر ذات الطاقات العليا على التقطيع والثقب (مثل ليزر الغاز الكربـــونى) اســـتغلالها فـــى الميكنة. وتستخدم أشعة الليزر باستمرار فى تنظيف المبانى التاريخية. يقوم الليـــزر بإزالة الطبقة الملوثة التى تتراكم على الأحجار بدون أن تضرها. ويصنع الليـــزر المعجزات فى الجراحة، بالذات جراحات العيون، وفى طـــب الأمـــراض الجلديـــة بحيث يسمح بالعلاج السطحي أو المكمل لعدد كبير من الإصابات، وتذهب العيوب الجلدية، الوشم والتجاعيد بفضل الليزر.

وفى الحد الأقصى لأنواع الليزر ذات الـــشدة الكبيـــرة، يوجـــد المـــشروع الفرنسى لليزر الملقب بـــ ميجاجول (Mega Joule) ومثيله الأمريكى (National ignition facility) NIF الاختصار لكلمة المرفأ القـــومى للإشـــعال. وفـــى هـــذه المشاريع يوجد ٢٤٠ شعاع ليزر مركز لمدة ١٦ نانو ثانية بشدة إجماليـــة قـــدرها

٥٠٠ تيرا واط terawatts 500 على هدف مكون من بضعة مليمتــرات مربعــة. درجة حرارة المادة الموجودة بالبؤرة تصل إلى عدة ملايين من الدرجات. الهــدف الرئيسى هو إنتاج انصهار حرارى ذرى عن طريق الليزر، ولكــن أيــضا هــذه الأنواع تستخدم لدراسة المواد عند تعرضها لظروف غاية فى الحدة كما يحدث فى النجوم.

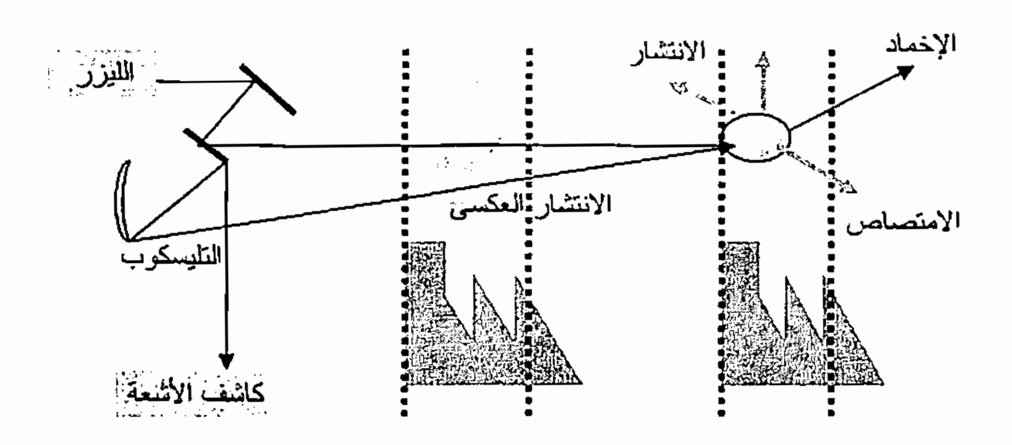
لقد أصبح الليزر جهازًا يختار لأداء أعــداد لا بــأس بهــا مــن الأبحــاث الأساسية. فى الفيزياء، يعتبر الرد الضوئى للذرات عند تعريضها لإضاءة الليــزر إمضاء لا يمكن تغييره لصفات هذه الذرات، مما يسمح بكشف وتحديد الآثار السيئة للمنتجات المختلفة. فى الكيمياء والبيولوجيا، نرى ولادة علم جديــد: فيمتوكيميــاء الليزر. فإذا كانت التفاعلات الكيميائية لمجموعة تستغرق فى بعض الأحيان ثوانى أو دقائق فى مستوى الذرات، كل شئ يحدث على مقياس الفيمتوثانية. لمعرفة مــا يحدث فى هذه المجالات نرسل ومضة ليزر غاية فى القصر قادرة علــى تــأجيج إرادة تفاعلات التحلل أو إعادة التوحد للجزيئات. وترسل ومضات أخرى بعد عــدة فيمتوثانية حتى تسمح بمتابعة تطور النظام ولتصوير ما يحدث فى الزمن الحقيقــى للتفاعل الكيميائى.

لنستكشف المعلومات التى راكمها الباحثون، أطوال الموجات التــى يمكــن للجزيئات امتصاصها، متابعة التلوث الجوى بالليزر (فى طور التطــور). طريقــة الليدار LIDAR المختصرة لكلمة كشف وقياس المسافات بضوء الليــزر (Light Detection and Ranging) تستخدم ليزر له ألوان معينة لكشف وجود أنواع معينة من الجزيئات غير المرغوب فيها بالهواء مثل أوكسيدات الآزوت أو الأوزون.

يرسل الليزر ومضات إلى المكان الملوث. ويُبث جزء ضعيف منهــا إلــى الاتجاه المعاكس، وبتحليل الضوء العائد نستطيع حساب تركيــز المــادة الملوثــة. ويعطى زمن الذهاب والعودة للومضات أبعاد السحابة الملوثة (الرســم ٥). وعــن طريق مسح الليزر لجميع الاتجاهات، نستطيع أن نرسم خريطــة ثلاثيــة الأبعــاد

للتكوين الجوى. ويوجد بعض الليدار التى تعمل أو تحت التجريب فى عدة مدن فرنسية. ظهر الليزر فى مخيلة الباحثين الذين رغبوا فى إثبات مفاهيم علمية جديدة. وحتى لو تصور المخترعون بعضنا من تطبيقات الليزر، لم يكن ليخطر ببالهم هذه النجاحات التى عرفتها استخدامات الليزر. فى وقت اختراعه أهّله البعض كحل فى دراسة عن مشكلة. وكان من الممكن أن يظل فى هذا الطور. وتعيش العلوم والتقنيات الآن عصر الليزر، بفضل تطور تقنيات أخرى على التوازى مثل الألياف الضوئية التى لا يتسبب استخدامها فى أى خسارة تذكر فى الاتصالات عن بعد.

وفى المقابل لم يعد من الممكن أن تحقق الأبحاث الموجهة نحو تطبيق معين وحدها نتائج. اليوم فى عالم تسيطر عليه الدخول القصيرة المدى، هذه الاختراعات تذكرنا أن السعى وراء المعرفة يفتح الأبواب إلى تطور تكنولوجى رائع.



الشكل (٥)

مفهوم الليدار

ترسل ومضة ليزر فى الغلاف الجوى. تمتصها الجسيمات والغازات جزئيا وترسلها للخلف. ويمكننا من خلال تحليل الضوء المرتد معرفة خصائص وتركيبة الهواء وطبيعة ملوثاته والمسافة التى تتواجد فيها (معمل لاسيم ليون) Lyon LASIM

تبريد الذرات باستخدام الليزر[١٠٧]

بقلم: كلود كوهين- تانودجى

Claude COHEN-TANNOUDJI

ترجمة: د. هدى أبو شادى

مقدمة

فى خلال الحقبتين الماضيتين، حدث تقدم مذهل استطعنا من خلاله التحكم فى حركة الذرات. وعن طريق إجبار هذه الذرات على التفاعل باستخدام أشعة الليزر فى اتجاه وبذبذبة واستقطاب مناسبين نستطيع الآن التحكم فى سرعة هذه الذرات، والحد من حركة الاهتزاز غير المنتظمة، وبطريقة ما نهدئها، مما يؤدى إلى تخفيض حرارتها. هذه الطريقة الجديدة اسمها "التبريد باستخدام الليزر". ونعرف منذ مدة أننا نستطيع التحكم فى مواقع الذرات والحفاظ عليها محاصرة فى مناطق صغيرة فى الفضاء نسميها "الفخاخ".

وعنوان هذا البحث هو التبريد بالليزر. وهدفه مزدوج. وسأشرح فى كلمات بسيطة كيفية عمل التبريد بالليزر: عندما تمتص ذرة الضوء أو تبثه، تتراجع (ترتد إلى الوراء).

كيف يتسنى لنا استخدام هذا التراجع لتبطيء وتبريد الذرات؟ ومن خلال هذا الشرح سوف أعيد إلى الأذهان المحفزات الأساسية لهذه الأعمال، والآفاق الجديدة التى تفتحها وأحاول الرد على بعض التساؤلات مثل: ما هى وظيفة الذرات فائقة البرودة؟ وما هى المشاكل الجديدة التى يمكن أن تحلها؟ وما هى التطبيقات التى نتطلع إليها؟

---

(١٠٧) نص المحاضرة رقم ٢١٧ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٤ أغسطس ٢٠٠٠.

ومن أجل القارئ الذى ليس له معرفة وثيقة بالمفردات المستخدمة فى فيزياء الذرة والإشعاع، وجدت أنه من الأفضل أن أذكركم ببضعة مفاهيم أساسية وبسيطة عن الفوتونات والذرات وآليات بث وامتصاص الفوتون من الذرة. ثم سأقوم بشرح آليات الفيزياء المستخدمة فى التبريد: ارتداد الذرة التى تبث أو تمتص فوتونا، وماذا يحدث عند وضع ذرة فى مسار شعاع ينبعث من الليزر، وكيف يسمح الارتداد المتواصل الذى يحدث للذرة بأن نبطئها ونبردها.

وسوف أنهى هذا العرض بشرح بعض الاستخدامات لهذه الأعمال. الساعات التى تعمل بالذرات الباردة، لها دقة فائقة والإنترفيرومترى Interferometry الذرية التى تستخدم ظواهر التداخل الناتجة من تراكب موجات دوبروجلى الذرية، وأخيرا سأشرح نوعا جديدا من حالة المادة اسمها مكثف بوز- آينشتين (Bose-Einstein condensate). ويفتح ظهور هذه الأجسام الجديدة عند درجات حرارة منخفضة جدا الأبواب أمام تطبيقات جديدة مثل الليزر الذرى الذى يتشابه فى عمله مع الليزر العادى لكنه يستخدم موجات دوبروجلى (de-Broglie) بدلا من الموجات الضوئية.

بعض المفاهيم الأساسية

الضوء:

الضوء هو موضوع دراسة طالما أثارت اهتمام الفيزيائيين والعلماء عامة. وظهر فى القرون الماضية على أنه شعاع من الجسيمات أو على أنه موجة. والآن نعرف جيدا أنه الاثنان معًا. فالضوء أولا موجة كهرومغناطيسية، أى مجال كهربى وآخر مغناطيسى يتذبذبان بتردد وينتشران فى الفراغ بسرعة كبيرة $C = 3 \times 10^8 m/s$. ومثل كل الموجات يتسبب الضوء فى ظواهر التداخل عند تراكب موجتين مختلفتين لهما السعة نفسها، فى بعض النقاط تتذبذب الموجات بحيث تتوافق أطوارها فتتضاعف سعتها وينتج عن ذلك تداخل بناء، وفى نقاط

أخرى تتذبذب مع عدم توافق أطوارها وينتج عن ذلك تداخل مدمر. ويمكن لنـــا أن نرى على شاشة تتابع من المناطق البراقة والأخـــرى المظلمـــة نـــسميها أهـــداب التداخل.

يتناسب لون الـــضوء مـــع تـــردده. ويمتـــد طيـــف الذبـــذبات للموجـــات الكهرومغناطيسية بدءًا من بضعة هيرتزات للأشعة السينية وأشعة جاما. ولا يشكل الضوء المرئى أكثر من منطقة صغيرة على هذا النطاق الطيفـــى. ومـــن الممكـــن تحليل المحتوى الطيفي للأشعة بفضل أجهزة مشتتة تتسبب فى إحداث حيود للأشعة الضوئية. يعتمد هذا الحيود على الذبذبة. ويشابه هذا ما يحدث عندما نمرر شـــعاعًا شمسيًا خلال منشور، فتحيد مكونات الضوء بطرق مختلفـــة ونـــشاهد مـــا نلقبـــه بالطيف.

فى بداية القرن، وبفضل أعمال بلانك وآينشتين، ثبت لنا أن الـــضوء لـــيس فقط موجة ولكنه مكون من مجموعة من الجسيمات المسماة الفوتونات. ولكل موجة ضوئية تردد ا v، يوجد فوتونات لها طاقـــة $E = h\nu$ وكميـــة حركـــة $P = P\nu/c$ تتناسبان مع التردد v. وفى هذه المعادلات، c هى سرعة الضوء وv هى التردد وh هى ثابت بلانك الذى قدمه لنا بلانك منذ ١٠٠ عام.

وسيطرت فكرة ازدواجية الضوء على البحث العلمى فى القرون الماضـــية. الضوء فى الوقت نفسه موجة وجسيمات. ولـــيس مـــن الممكـــن فهـــم الظـــواهر المصاحبة له بدون هذه الازدواجية. هذه الازدواجية لا يمكن الاستغناء عنهـــا ولا يمكن فصلها.

الذرات:

الذرات عبارة عن نظام كوكبى مشابه لنظامنا الشمسى. فهى مكونـــة مـــن جسيمات خفيفة اسمها الـ لكترونات، لها شحنة سالبة وتدور فى مـــدارات حـــول نواة لها كتلة كبيرة وشحنة موجبة.

وعندما حاول العلماء فهم حركة الإلكترونات اكتشفوا عدم صلاحية الميكانيكا الكلاسيكية لشرح ما يحدث لأنها كانت تعطيهم نتائج عجيبة. ومن ثم اخترعوا ميكانيكا الكم التى تحكم العالم على المقياس المجهرى. إننا نتحدث الآن عن ثورة فكرية فى المفاهيم كالثورة التى أحدثتها النسبية العامة والخاصة. وأحد التنبؤات الكبرى لميكانيكا الكم هو تكمية القيم الفيزيائية وبالذات الطاقة.

وفى النظام الذرى الذى له مركز ثقل يرتكز بداخل النواة، حيث تتواجد أكبر كتلة، نرى أن الإلكترونات لها قيم طاقة مكماة محددة وفريدة، تسمى الأعداد الكمية.

ولكى أُبين مفهوم التكمية، شرحت فى الرسم كيف يوجد مستوى أرضى ومستوى مستثار نمثلهما بواحد واثنين ولهما قيم معينة كما فى الرسم (١).

E_2 —————— المستوى المستثار الثانى

E_1 —————— المستوى المستثار الأول

E_0 —————— المستوى الأرضى

الشكل (١)

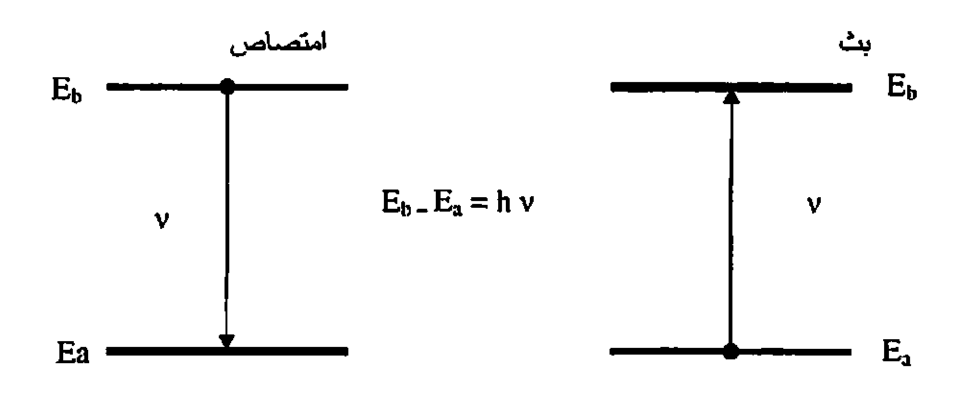
يبين مستويات الطاقة للذرة. كل خط له طول يتناسب مع قيمة مستوى طاقة المستوى

تفاعل المادة – الضوء:

كيف تتفاعل الذرة مع الضوء؟

بث الضوء وامتصاصه عن طريق الذرة

يمكن لذرة فى مستوى طاقة E_b أن تهبط لمستوى طاقة E_a. عندئذ تقوم الذرة ببث ضوء له تردد ν، بالتحديد فوتون بطاقة $h\nu$ يتبع المعادلة $E_b = E_a = h\nu$. أى أن الطاقة التى فقدتها الذرة عند انتقالها من المستوى E_b إلى E_a أخذها الفوتون. وهكذا تتحول العلاقة ما بين فقدان الطاقة للذرة واكتسابها كاملة للفوتون إلى تعبير صريح عن مبدأ بقاء الطاقة (الرسم ٢).



الشكل (٢)

يمثل عملية بث فوتون على اليسار وعملية امتصاص فوتون على اليمين

وتوجد الآلية المعاكسة لهذا، بالطبع آلية امتصاص الذرة الذى تكون مبدئيا فى المستوى الأرضى تمتص فوتونا له طاقة $h\nu$ وتكتسب طاقته. هذه الطاقة المكتسبة تنقله من المستوى E_a إلى E_b. يتضح لنا أن تكمية الطاقة الذرية إلى قيم محددة يؤدى إلى الصفات المحددة لطيف الترددات المنبعثة أو الممتصة من الذرة.

الضوء: مصدر أساسى للمعلومات عن بنية الذرة

لا تستطيع الذرة أن تبث كل الترددات الممكنة، تستطيع أن تبث الترددات الناتجة عن فروق مستويات طاقتها فقط. وفى الواقع من خلال قياسنا للترددات المنبعثة أو الممتصة، نستطيع أن نعيد بناء القيم E_b-E_a، ونحصل على رسم توضيحى لطاقة الذرة. وهذا ما نلقبه بعلم السبكتروسكوبى (علم قياس أطياف المواد Spectroscopie). ويختلف الطيف الذرى من ذرة إلى أخرى. وتختلف الترددات المنبعثة من ذرة الهيدروجين عن الأخرى الصادرة من ذرة الروبيديوم أو البوتاسيوم. ويعتبر الطيف الصادر من الذرة كالبصمة الرقمية أو اقتباسا للكلمة الشائعة "بصمة جينية". ومن الممكن معرفة نوع الذرة عند رصد الترددات التى تبثها. أو بطريقة أخرى، عند رصد الضوء الصادر من أنواع مختلفة من الأوساط، نستطيع أن نكون معلومات عن مكوناتها. وكذلك فى الفيزياء الفلكية تستطيع القياسات السبكتروسكوبية تحديد المكونات الجوية للكواكب والشموس وتعيين الجزيئات الموجودة فى الفضاء بين هذه الكواكب والشموس. ورصد تأخر الترددات المنبعثة من هذه الأجسام الفلكية يسمح لنا جيدا بفهم سرعات هذه الأجسام وحساب توسع الكون. ويسمح رصد الضوء المنبعث والممتص بدراسة الأوساط العدائية مثل البلازما أو اللهب وتحليل مكوناتها فى أماكنها.

مدة حياة حالة مستثارة:

لندرس ذرة منعزلة، محضرة فى حالة استثارة E_b. توضح التجربة أنه فى غضون وقت قصير، تسقط الذرة فوريا فى حالة أدنى من الطاقة E_a عن طريق بث فوتون فى أى اتجاه، له طاقة $h\nu = E_b-E_a$. تحدث آلية الانبعاث فى غضون هذا الزمن القصير جدا المسمى مدة حياة الحالة المستثارة. لا تستطيع الذرة أن تبقى مستثارة للأبد. وتتراوح مدة حياة الحالة المستثارة من ذرة إلى أخرى ولكنها فى حدود 10^{-8}s أى واحد على عشرة مليارات من الثانية.

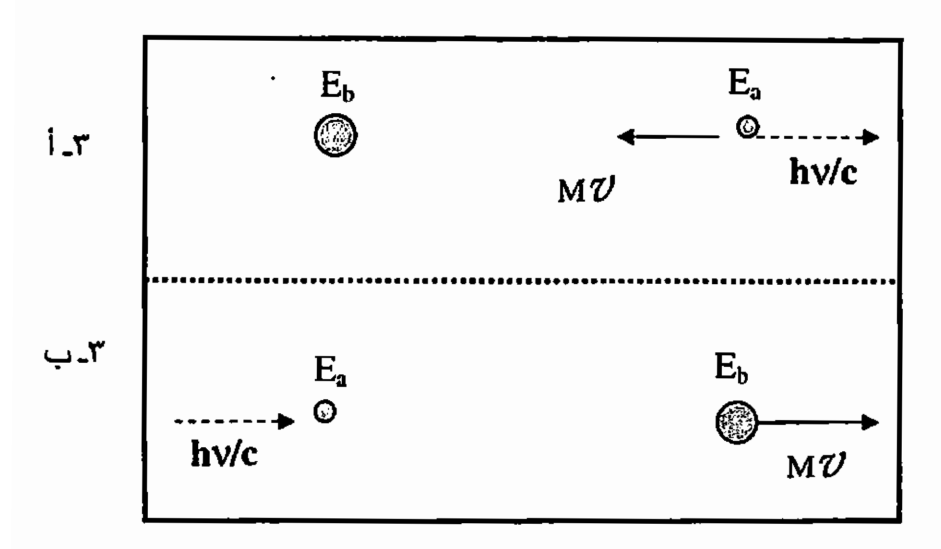
الآليات الفيزيائية:

وبعد هذا التذكير بالمفاهيم الأساسية، نبدأ الآن الجزء الثانى من محاضـــرتنا عن الآليات الفيزيائية الأساسية للتبريد بالليزر.

ارتداد الذرة بعد انبعاث أو امتصاص فوتون:

فى الفيزياء يوجد قانون أساسى يسمى مبدأ "بقاء كمية الحركـــة". ولنـــدرس حالة ذرة مستثارة أوليا فى مستوى E_b وساكنة، ولنتخيل أنه عند الزمن $t=0$، هـــذه الذرة تبث فوتوناً له كمية حركة $P = hv/c$. فى الحالة الأولية تكون الـــذرة وحيـــدة وساكنة، عندئذٍ تساوى كمية الحركة العامة صفراً. وفى الحالة النهائية، عند خروج الفوتون بكمية حركة hv/c، تتراجع الذرة بكمية حركة معاكسة قدرها $Mv=hv/C$ (الرسم ٣). وكما ترون فى الحقيقة أو علـــى شاشـــة التليفزيـــون، موقـــع يطلـــق صاروخا: عندما يطلق المدفع شحنته يتراجع. وبالطريقة نفسها عندما تبث الـــذرة فوتونا تتراجع تماشيا مع مبدأ بقـــاء كميـــة الحركـــة وســـرعة الارتـــداد قـــدرها $v_{rec} = hv/MC$.

وظاهرة الارتداد نفسها تظهر فى حالة الامتصاص. فلندرس ذرة فى حالـــة أرضية E_a أوليا ولا تتحرك، ولنتخيل أننا نرسل لها فوتوناً: الذرة تمتص الفوتـــون وتنتقل إلى الحالة المستثارة. وتتراجـــع إذن بـــسرعة الارتـــداد نفـــسها hv/MC. بالضبط كما نطلق رصاصة على هدف، يرتد الهدف بسبب كميـــة الحركـــة التـــى امتصها من المقذوف.



الشكل (٣)

يمثل ارتداد (تقهقر) الذرة بعد بثها (الرسم ٣-أ) أو امتصاصها (الرسم ٣-ب) لفوتون

ونعلم أن امتصاص الذرة لفوتون وتغير حالة طاقتها لابد أن يتبعه بعد وقت قصير انبعاث يرجعها إلى حالتها الأولية، مصحوبًا ببث فوتون، لأن الذرة لا تستطيع أن تبقى لا نهائيا مستثارة. أثناء هذه الدورة للانبعاث والامتصاص اللذين من خلالهما يمتص الفوتون وترتد الذرة ثم تبث فوتونًا، يبقى احتمال بث الفوتون فى هذا الاتجاه أو الاتجاه الآخر أو الاتجاه العكسى كما هو، بحيث تصبح قيمة السرعة التى يفقدها أثناء الانبعاث فى المتوسط بصفر.

وينتج عن هذا أن التغير فى سرعة الذرة، فى المتوسط، مرتبط بآلية الامتصاص وقيمته $v_{rec}= h\nu/MC$ وهذه نتيجة مهمة لشرح الآتى.

الذرة فى مسار شعاع الليزر:

لنحاول الآن تخيل كيفية تفاعل ذرة تعرضت، ليس فقط لفوتون واحد ساقط عليها، ولكن لشعاع رنينى لليزر، يُسقِط سيلاً من الفوتونات على الذرة. يُمتص

واحد ثم ينتقل إلى حالة مستثارة أولى ويسقط إلى حالته الأولية ويبث فوتونا ثم يمتص فوتونا ثانيا وينتقل إلى مستوى مستثار ويعود إلى مستوى أدنى ويبث فوتونا وهكذا دواليك. تتعرض الذرة المغمورة فى شعاع الليزر إلى سلسلة من الدورات المتعاقبة للامتصاص والانبعاث دون توقف ولكل دورة من هذه الدورات سرعة متوسطة قدرها $v_{rec} = hv/MC$. وبما أن متوسط مدة حياة ذرة مستثارة قدره حوالى 10^{-8}sec تحدث حوالى 10^{8} دورة امتصاص وبث فى الثانية، أى مائة مليون دورة فى الثانية.

بالنسبة لذرة الصوديوم، سرعة التراجع قيمتها 3 mm/s هذه السرعات بطيئة جدا بالمقارنة مع سرعة جزيئات الهواء التى قيمتها 300m/s. ولهذا السبب تعتبر سرعات تراجع الذرات شبه مهملة، فى الواقع تختلف الحالة جذريا لذرة فى مسار شعاع الليزر. تتكرر دورات الانبعاث والامتصاص مائة مليون مرة فى الثانية، مما يولد تغيرات فى السرعة بمقدار مائة مليون مرة من قيمة سرعة الارتداد فى الثانية. وهكذا نحصل على تعجيل أو تقاصر بقدر $10^{6}m/sec^{2}$. وحتى نتخيل ما يحدث، لنأخذ مثالا من الحياة عند سقوط جسم تحت تأثير عجلة g الجاذبية الأرضية التى قيمتها حوالى $10m/s^{2}$ وعند تعرض ذرة من الصوديوم للإشعاع الصادر من الليزر تصبح معجلة (مقصرة) بقيم تصل إلى $10^{5}g$. وحتى ندرك ما يحدث أيضا، هذه العجلة 100000 مرة أكبر من عجلة عربة لها سرعة 36km/h وتتوقف فى ثانية.

إبطاء التدفق الذرى

تتسبب القوى التى يسلطها الضوء على الذرات فى تراكم عدد كبير من التغيرات الصغيرة فى السرعة، تسمح بإيقاف التدفق الذرى. ولندرس تدفق ذرى خرج من فرن حرارته 300°k أو 400°k وينتشر بسرعة قدرها 1km/s. عند إضاءة هذا التدفق بأشعة ليزر رنينية، يؤدى ضغط الإشعاع الذى تتعرض له

الذرات إلى إبطائها أو حتى توقيفها أو تغيير مسارها. ستتوقف ذرة لها سرعة أولية v_0=1km/s أى 10^3m/s بقصور قدره 10^6m/s^2 فى خلال 10^{-3}s أى فى ميلليثانية. فى ميلليثانية، تمر الذرة من 1km/s إلى 0 ! تحسب المسافة التى قطعتها الذرة قبل أن تتوقف بالمعادلات الكلاسيكية. إنها تساوى مربع السرعة الأولية على اثنين فى قيمة القصر. ونحصل هكذا على مسافة قدرها L=0.5m. وهكذا نستطيع أن نوقف تدفقًا ذريًا فى معمل على مسافة 1m عن طريق استخدام شعاع مناسب لليزر. ومن كثرة حدوث الإبطاء وبسبب ظاهرة دوبللر Doppler Effect، تخرج الذرات من حالة الرنين.

لابد إذا أن نعدل ترددات شعاع الليزر حتى نحتفظ بحالة الرنين (أو تعديل تردد الذرات)، وهكذا تحافظ القوة على قيمتها القصوى أثناء آلية التقاصر (القصر).

إبطاء الذرات عبارة عن تقليل لسرعتها المتوسطة. مع بقاء قيم مشتتة حول القيمة المتوسطة. ولابد لنا أن نفرق جيدا بين حركة المجموعة التى لها سرعة متوسطة وبين حركة الاهتزاز غير المنتظم حول قيمة متوسطة للسرعة فى الفيزياء، تمثل هذه الاهتزازات غير المنتظمة الحرارة. وكلما زادت درجة حرارة الوسط، زادت سرعة الاهتزازات غير المنتظمة. إذن التبريد يعنى الإقلال من سرعة الاهتزاز غير المنتظم ومكوناته. كيف نستطيع تبريد الذرات عن طريق أشعة الليزر؟

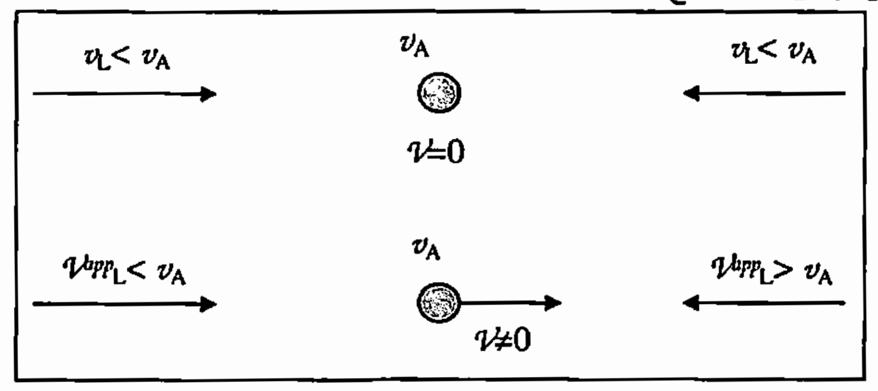
التبريد عن طريق الليزر الدوبلرى Doppler

الآلية الأكثر استخداما فى تبريد الليزر هى التى تستخدم ظاهرة دوبلر وتم اقتراحها فى منتصف السبعينات عن طريق هانش Hansch، شاولو Schawlow، فينلاند Wineland وديهملت Dehmelt. يوضح الرسم (٤) فكرة بسيطة: تتعرض الذرة ليس لشعاع واحد من الليزر، ولكن لشعاعين لهما اتجاه انتشار معاكس. هذه

الأشعة لها الشدة نفسها والتردد نفسه ν_L. هذا التردد ν_L أقل قليلا من التردد ν_A للانتقال الذرى. ماذا يحدث إذن؟

إذا كانت الذرة لا تتحرك ولها سرعة $\nu = 0$ لا نحصل على ظاهرة دوبلر. وفى هذه الحالة يصبح لشعاعى الليزر التردد الظاهرى نفسه. والقوى التى تفرضها لها القيم نفسها وإشاراتها مختلفة. وتساوى قوة الضغط الإشعاعى القادمة من اليمين قوة الضغط الإشعاعى القادمة من اليسار بحيث لا تتعرض الذرة لأى قوة. أما إذا تحركت الذرة إلى اليمين بسرعة غير مهملة ν وبفضل ظاهرة دوبلر يظهر تردد الموجة التى تنتشر فى الاتجاه المعاكس أكبر من قيمته. هذا التردد الظاهرى يمكن مضاعفته حتى يقترب من الرنين.

وهكذا يزداد عدد الفوتونات الممتصة وتزداد القوة. والعكس يحدث للموجة التى لها نفس اتجاه الذرة، ينقص ترددها الظاهر بسبب ظاهرة دوبلر وتبتعد عن الرنين. وهكذا يصبح عدد



الشكل (٤)

مبدأ التبريد باستخدام الليزر الدوبلرى. الرسم (٤- أ) - ذرة فى حالة سكون تتعادل قوتا الضغط الإشعاعى بالضبط. الرسم (٤- ب) - يمثل ذرة فى حالة حركة، حيث ينتشر التردد الظاهرى فى الاتجاه المضاد ويزداد حتى يقترب من الرنين كما يؤثر بقوة ضغط إشعاعى أكبر من القوة المصاحبة للموجة التى تنتشر فى نفس اتجاه الذرة وتتأثر بظاهرة دوبلر وتبتعد عن الرنين.

الفوتونات الممتصة أقل ومن ثم تقل القوة. وبسبب ظاهرة دوبلر، لا تتعادل قوتا الضغط الإشعاعى.

إنها القوة المعاكسة للسرعة التى تحمله، ومن ثم تتعرض الذرة إلى قوة عامة غير مهملة، تعترض سرعتها. هذه القوة العامة F يمكن وضعها فى معادلة تتناسب فيها مع السرعة الضعيفة بحيث $F = -\alpha v$ وتمثل α معامل الاحتكاك. أو تتعرض الذرة فى هذا للنظام المكون من شعاعين من الليزر ينتشران فى اتجاه معاكس إلى قوة احتكاك تعترض سرعتها وتتواجد فى وسط لزج نسميه "العسل الضوئى" بالتشابه مع علبة مليئة بالعسل. وتحت تأثير هذه القوة، تَخبو سرعة الذرة حتى تقترب من الصفر.

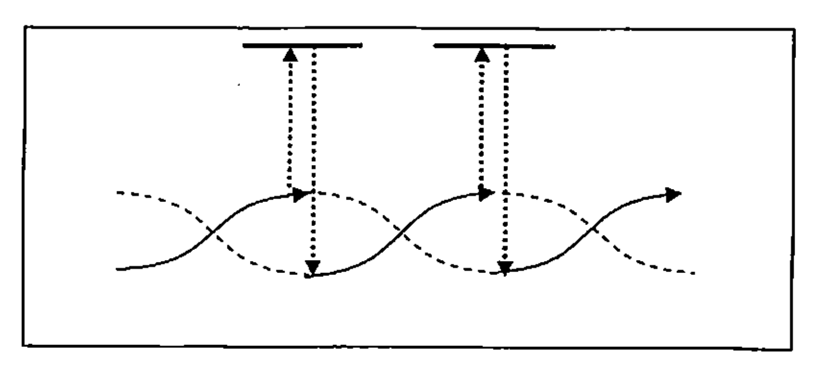
التبريد السيسفى:

تسمح لنا الدراسة النظرية لآلية التبريد بالليزر الدوبلرى بالتنبؤ بدرجات الحرارة التى تنتج عنها والتى تصل قيمتها إلى 10^{-4}K. عندما استطعنا فى نهاية الثمانينات أن نقيس درجات الحرارة بطريقة دقيقة، لاحظنا أن درجات الحرارة المقاسة أصغر مائة مرة عن المتنبأ بها، مما يعنى وجود آليات أخرى فى الصورة. إحدى هذه الآليات لاحظتها أنا وزميلى جون داليبارJohn Dalibard ودرسناها بالتفصيل ولقبناها بالتبريد السيسفى Sisyphe.

دون الدخول فى تفاصيل هذه الآلية، سنعطى القارئ فكرة عامة عنها. تستخدم تجارب التبريد بالليزر زوجين من الموجات التى تنتشر فى اتجاهين مختلفين (الرسم ٤).

تتداخل هذه الموجات وتعطى محصلتها موجة لها شدة واستقطاب يتغيران دوريا فى الفضاء أو نستطيع أن نبين تغير أماكن مستويات طاقة الذرة طفيفا بفعل الضوء، بقدر يتناسب مع شدة الضوء ويعتمد على الاستقطاب الضوئى.

تمتلك كل ذرة عدة مستويات تحتية للطاقة في حالتها الأساسية، يرتبط كل مستوى تحتي بقيم مختلفة للمتغيرات الفيزيائية مثل الطاقة مكماة، وكذلك طاقة الحركة، وتعتبر عندئذ الذرة كنحلة صغيرة جدا تدور حول نفسها. يمثل الرسم (٥) نموذجًا لمستويين تحتيين للطاقة يمتدان في الفضاء تحت تأثير الضوء.



الشكل (٥)

الأثر السيسفي

وتتحرك الذرة في وديان الطاقة وروابيها، وتغير موقعها طبقا للمستوى التحتي الذي تتواجد فيه. ولندرس الآن ذرة تتحرك لليمين وتتواجد أوليا في أدنى وادي الجهد (الطاقة) في مستوى تحتي محدد (الرسم ٥). تتسلق هذه الذرة رابية الجهد (الطاقة) وتبلغ القمة حيث يمكنها أن تمتص أو تبث فوتونًا، آلية من خلالها تنتقل الذرة إلى مستوى تحتي آخر للطاقة، في قاع واد آخر للطاقة. ويمكن لهذا السيناريو أن يتكرر، تتسلق الذرة مرة أخرى رابية الجهد (الطاقة) قبل أن تصل إلى قمته وتذهب إلى مستوى تحتي آخر في قاع واد آخر وهكذا دواليك.

مثلها مثل البطل الإغريقي، يحكم على الذرة بتكرار هذه الآلية وفي كل مرة تفقد قدرًا من طاقتها الحركية. وبعد وقت معين تصاب الذرة بالإجهاد بحيث لا تستطيع أن تتسلق أي رابية وتظل قابعة في قاع البئر. أثبتت الدراسات النظرية والمعملية أن هذه الآلية تسمح لنا بالوصول إلى درجات تبريد تصل إلى

ميكروكيلفين، أى $10^{-6}K$ وابتكرنا طرقًا أخرى فى المعمل للحصول على $10^{-9}K$، أى واحد على مليار من الكيلفن.

عند هذه الدرجات، تتراوح سرعة الذرات ما بين cm/s إلى mm/s، أما عند درجة حرارة الغرفة تكون فى حدود km/s. استطاعت هذه الآليات تهدئة حركة الاهتزازات غير المرتبة للذرة وجعلها شبه ساكنة. ومن الممكن أيضا أن نحصر هذه الذرات فى مناطق معينة فى الفضاء نسميها الفخاخ بفضل استخدام متغير لشدة الضوء أو لشدة المجال المغناطيسى.

شرح لبعض التطبيقات

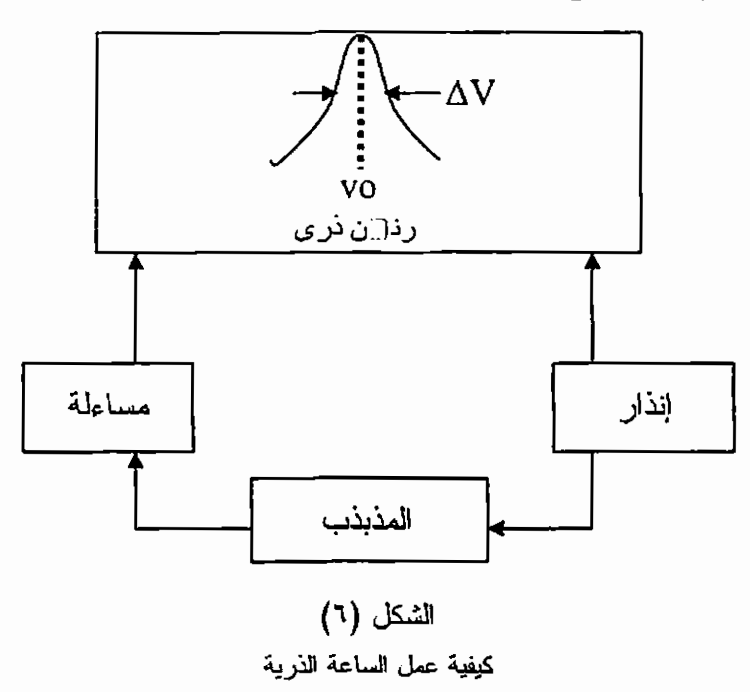
الساعات الذرية:

تفتح التطبيقات العملية للذرات الباردة المجال أمام استخدام جيد لسرعتها الصغيرة جدا. تسمح لنا هذه الخاصية برصدها لمدة كبيرة من الزمن، أو يصبح القياس فى الفيزياء أكثر دقة كلما زاد وقت الرصد. ونفهم جيدا أنه بفضل الدقة الفائقة للقياسات التى تمت على الذرات الفائقة البرودة استطعنا أن نحقق تقدما فى مفهوم الساعات الذرية.

ولنتذكر الآن كيف تتكون الساعة، إنها تتكون من اهتزازات دورية ككوارتز يتذبذب بتردد معين وفى الوقت نفسه يتغير التردد الخاص بالكوارتز مع مرور الزمن. يتزايد (بعجلة) أو يتناقص (قصر). لكى نحصل على ساعة مستقرة، لابد لنا أن نمنع ترددها من الحيود. ولكى نحقق ذلك، لابد أن نجعل تردد الكوارتز مساويًا للتردد الرئيسى لشعاع ذرى.

ومفهوم هذه العملية مشار إليه فى الرسم (٦) المذبذب الذى يحكمه الكوارتز، يصدر موجة كهرومغناطيسية لها نفس تردد ذبذبات الكوارتز٧. تسمح هذه الموجة بسؤال الذرات المستخدمة لجعل الساعة مستقرة. وبعد إرسالها إلى

الذرات ومسح تردد الكوارتز، نلاحظ وجود رنين عند تطابق قيمة ν مـــع الذبذبـــة الممثلة بالفرق بين مستويين لطاقة الذرة $\nu_0 = (E_b-E_a) / h$. ويوجد جهاز للتحذير، يضبط تردد الكوارتز لكى يبقيه فى قلب الشعاع الذرى. وهكذا نجعـــل ν مـــستقرة عن طريق إرغامها على أن تظل مساوية لقيمة ν_0.



الشكل (٦)
كيفية عمل الساعة الذرية

فى الواقع، نستخدم ذرة السيزيوم لتعريف وحدة الزمن، الثانيـــة. بالاتفـــاق الدولى، تعادل الثانية 9192631770 دورة ذبذبـــة حيـــث $T_0 = 1/\nu_0$، ويعتبـــر ν_0 التردد المصاحب لانتقال معين، يصل إلى مستويين تحتيين للطاقة، للحالة الأساسية لذرة السيزيوم. هذا التردد عالمى، وهو ثابت لكل ذرات السيزيوم أينما كانت.

ليس الشعاع الرنينى الذرى لامتناهى العرض، لكن له عرض $\Delta\nu$ (كما فى الرسم٦). وكلما نقص عرضه صار الإنذار أكثر فاعلية وأصبحت الـــساعة أكثـــر استقرارا.

ونستطيع أن نبين أن عرض انتقال ذرى يصل بين مستويين تحتيين للحالة الأولية للذرة يتناسب عكسيا مع زمن الرصد T_{obs}، وكلما زاد زمن الرصد T_{obs} أصبح الشعاع رقيقا. وتصبح الأشعة الناتجة غاية فى الدقة عند استخدام الذرات المبردة حيث إن الأخيرة تمتد من زمن الرصد ومن ثم نستطيع أن نصنع ساعات غاية فى الدقة. وتستخدم الساعات التى صنعت لليوم تدفق ذرات السيزيوم التى تنتشر بسرعات تقدر بـ km/s فى أجهزة لا يزيد عرضها عن متر. ويقع زمن الرصد لهذه الأجهزة فى حدود الميلليثانية. واستطعنا بفضل الذرات المبردة أن نعدل زمن الرصد بمائة مقدار ومن ثم زاد أداء الساعات الذرية بالمقدار نفسه.

فى الواقع، لا يُستخدم فى هذه الأجهزة تدفق ذرى أفقى مهدئ لأنه سيقع بسهولة تحت تأثير الجاذبية الأرضية. فى الساعات الذرية الجديدة نستخدم تدفقا ذريًا رأسيًا. أو بالتحديد تقذف الذرات التى تم تبريدها فى العسل الضوئى إلى أعلى بمساعدة ومضة من الليزر وتشكل نافورة. وتمر فيما بعد فى الفجوة الكهرومغناطيسية التى يقاس فيها الرنين الذرى، المرة الأولى فى حركة الصعود والمرة الثانية فى حركة الهبوط عند سقوطها تحت تأثير مجال الجاذبية. من الممكن عندئذ أن يصل زمن الرصد إلى حوالى واحد على عشرة من الثانية ويصبح هكذا مائة مرة أكبر من زمن الساعات القديمة. هذه النوعية من الساعات الذرية الباردة تم تصميمها فى باريس على يد أحد زملائى كريستوف سولومون (Christophe Solomon) بالتعاون مع أندريه كليرون (Andre Clairon) من LPTFBNM (المعمل الأولى للزمن والتردد والمركز القومى للأرصاد الجوية). استطاعوا عن طريق استخدام نافورة لها ارتفاع 1m أن يصمموا الساعة الذرية الأكثر استقرارا فى العالم. يحدد جودة الساعة عاملان، الأول الاستقرار الذى يبين التغير النسبى للتردد مع الزمن، وهو فى حدود 10^{-16} لإشارة متوسطة فى زمن قدره 10^{4}sec، مما يعنى أن عند وضع ساعة ذرية فى بدء الخليقة أى منذ عشرة مليارات سنة، تتأخر الساعة بعد مضى هذا الزمن بمقدار بضع ثوان. والعامل الثانى: الدقة. فإذا صممنا ساعتين، تتوافق تردداتهما لأقرب 10^{-15} مع الاعتبار أن التردد يتغير طفيفا بسبب الآثار الطفيلية.

هذه الساعات الذرية الباردة لها استخدامات متعـــددة: مثـــل GPS (النظـــام العالمى لقياس الموضع)، نظام قياس الموضع عن طريـــق الأقمـــار الـــصناعية، وتزامن شبكات الاتصال عن بعد ذات الحمولات العالية وتجارب الفيزياء الأساسية (الجاذبية العامة، والتغير فى الثوابت الأساسية). هل نستطيع أن نعدل من أدائهـــم عن طريق وضع نافورة بارتفاع 10m مثلا؟ فى الواقع مشروع من هذا القبيل ليس واقعيا، لأن زمن المشاهدة لا يزيد إلا بالجذر التربيعى للطول ولابـــد مـــن عـــزل المجال المغناطيسى للأرض (الذى يمكن أن يغير قيمة تردد الساعة) على مـــساحة أكبر. والحل الأمثل هو التخلص من الجاذبية الأرضية، ولهذا السبب اهتمت فرنسا بالتجارب الخاصة بالجاذبية الميكروية Microgravite منذ ١٩٩٣. هذه التجـــارب تقع فى طيارة يقوم الطيار باتخاذ مسار قطع مكافئ فى غضون عشرين ثانية، عدة مرات. ولكى يفعل ذلك، يعجل الطيار الطائرة على °45 فى حالة صعود، ثم يقطـــع مرة واحدة الوقود. فى خلال الثوانى العشرين التى تلى هذا، تصبح الطـــائرة فـــى حالة سقوط حر وتأخذ مسارا على شكل قطع مكافئ. وفى داخل الطـــائرة، تطفـــو الأشياء فى الهواء ولا تسقط على جوانب الطائرة كما لو أن الجاذبية انعدمت، ثـــم يعيد الطيار استخدام الوقود ويعدل من المسار ليصل إلى حالة صعود ليعاود الكرة.

وهكذا استطعنا أن نقوم بتجارب على السلوك المختلف لمكونات التجربة فى هذه الظروف. وأظهرت النتائج أنه من الممكن أن نصنع ســـاعات تـــستخدم ذرات مبردة فى انعدام الجاذبية. وبعد هذه التجارب، تم إجراء اتفاقية دولية، لتحديد هـــذه التجارب ووضع ساعة ذرية لذرات مبردة فى المحطة الفضائية الدولية فى حـــدود سنة ٢٠٠٤.

التداخل الذرى:

منذ نشر أعمال دوبروجلى (de Broglie)، نعلم أن كل الجسيمات التى لهـــا كتلة M وتصاحبها موجة نسميها موجة دوبروجلى، ولهـــا طـــول مـــوجى λ_{dB} ، وتحقق هذه المعادلة $\lambda_{dB} = h / M v$

أى أنها تتناسب عكسيا مع السرعة v. وكلما قلت السرعة زاد طول الموجة. إذن الذرات المبردة التى لها سرعات منخفضة جدا، لها طول موجى كبير، ومن ثم يصبح من السهل إثبات سلوكها الموجى.

ولنتخيل الآن تجربة يونج (Young) التى استخدم فيها الضوء. مصدر ضوئى يضيء فتحة ثقبت فى حائل. والضوء الخارج من هذه الفتحة يصل إلى حائل آخر به ثقبان آخران ونضع شاشة على مقربة من الحائل الثانى على التوالى. وهكذا تتبع الأشعة الضوئية مسارين، من خلال مرورها من الفتحة الأولى أو الثانية حتى تصل إلى الشاشة التى تسجل شدة الضوء. وعلى حسب مكان نقطة الرصد على هذه الشاشة، تتراكب الموجتان عند وصولهما إلى هذه النقطة بعد مرورهما من المسارين إما بالطور نفسه وإما بطور معاكس. ومن ثم تتغير شدة الموجة بين قيمة عالية وقيمة تساوى الصفر ونشاهد ما نسميه بأهداب التداخل. ومنذ عدة سنوات، ظهرت عدة تجارب مشابهة مع موجات دوبروجلى المصاحبة للذرات المبردة. قام فيزيائيون يابانيون هم البروفسير فوجيو شيميزو Fujio Shimizu وزملاؤه فى جامعة طوكيو بإجراء تجربة غاية فى الإبهار. تعتمد التجربة على إسقاط سحابة من الذرات المبردة والمحاصرة سقوطًا حرًّا على لوحة مثقوبة ثقبين. وبعد مرورها من الثقبين، تقوم الذرات بالاصطدام بكاشف (الشاشة) ونستطيع أن نرصد تتابع الاصطدام فى مكان محدد. فى البداية تكون التصادمات عشوائية. ثم تتكدس مع ازدياد عددها اختياريا فى أماكن معينة، ونرى بوضوح تتابع أهداب براقة مع عدد تصادمات كثيف جدا وأهداب داكنة مع عدد تصادمات قليل. تبين هذه التجربة بوضوح ازدواجية الموجة – الجسيم. الذرات عبارة عن جسيمات نستطيع أن نرصد اصطدامها بشاشة الكشف. وفى الوقت نفسه تصاحبها موجة، تمر هذه الموجة فى الثقبين ومن ثم تُولد موجتان متداخلتان تتحكمان مكانيا فى احتمال كشف الذرات. ونصبح الآن فى قلب ميكانيكا الكم ومفهوم الازدواجية الذى يسيطر على كل المواضيع الفيزيائية.

مكثف بوز-آينشتين:

منذ عدة سنوات حدث تقدم مبهر فى مجال آخر: مكثف بوز-آينشتين (Bose-Einstein). عند درجات حرارة منخفضة جدا، وكثافة مرتفعة، يصبح التمدد المكانى لموجات دوبروجلى المصاحبة لكل ذرة أكبر من المسافة المتوسطة بين ذرتين بحيث تتداخل باقات الموجات وتغطى بعضها البعض. ومن ثم نرى ظاهرة جديدة، نسميها "مكثف بوز-آينشتين" (Bose- Einstein condensate): كل الذرات تتكثف فى الحالة الكمية نفسها، المستوى الأساسى لبئر الطاقة الذى يحتويها. هذه الظاهرة التى تنبأ بها منذ زمن بعيد بوز- آينشتين، تلعب دورا مهمًا فى بعض السوائل، مثل الهيليوم الفائق السيولة. وتم رصده منذ خمس سنوات لأول مرة فى الولايات المتحدة، على النظم الغازية، مكونة من ذرات مبردة. ومن ثم أصبح موضوع العديد من الدراسات النظرية والمعملية فى معامل كثيرة.

مجموعة الذرات المكثفة فى الحالة الأساسية للفخ الذى يحتويها لها اسم المكثفات. كل الذرات توصف بدالة الموجة نفسها. وهكذا نحصل على موجة عملاقة للمادة. هذه النظم الكمية العينية لها صفات غاية فى التفرد: التماسك، والميوعة الفائقة، والتى تم رصدها ودراستها باستفاضة. وحاولت عدة فرق بحثية أن تستخرج شعاعًا ذريًا متماسكًا من مكثف بوز- آينشين لتحقيق الليزر الذرى الذى يشابه موجات دوبروجلى الذرية مع الليزر الكلاسيكى الذى يستخدم الموجات الكهرومغناطيسية. وعندما نصل إلى تشغيل مصدر متماسك من موجات دوبروجلى الذرية، من الممكن أن نثير تطورا مبهرا لمجالات أخرى من البحث، كالقياس الطيفى الذرى والليثوجرافيا Lithographie الذرية.

الاستنتاج:

أدت دراسة خواص الضوء وتفاعلاته مع المادة للفيزياء إلى تقدم رائع فى خلال القرن العشرين. ومع ذلك أصاب التقدم بعض التراجع. وأعطت الدراسات

مفهومًا جديدًا للعالم المجهرى. وولدت ميكانيكا الكم. وأثبتت ازدواجيـــة الـــضوء. وظهرت مصادر جديدة من الضوء والليزر.

وأتمنى أن أكون قد أقنعتكم بأن الضوء ليس وحده مصدرا للمعلومات عـــن الذرة ولكنه أيضا وسيلة للتفاعل معها. ونستطيع الآن أن نتحكم فى درجات حريـــة الذرات، والتحكم فى موقعها وسرعتها. فتح هذا الإتقان فى الـــتحكم فـــى الـــضوء والمادة الأبواب لمفاهيم ومواضيع جديدة للبحث. وظهرت مواضيع جديدة للبحـــث، مثل موجات المادة، الليزر الذرى، والنظم الكمية المتردية التى تنتظـــر تطبيقاتهـــا الوقت لتظهر غدا فى القرن الحادى والعشرين.

قراءات إضافية:

* http://www.lkb.ens.fr/recherche/atfroids/tutorial/welcome.htm.
- De la lumiere laser aux atomes ultrafroid
- Des explication simples sur le refroidissement et le piegeage d atome par laser et les applications de ce champ de recherche.

* http:/www.ens.fr/cct
- le cours de claude tanoudji au cellege de France.
- Etude et analyse de recherche recent sur la condensation de Bose-Einstein.

يشكر الكاتب السيدة نادين بوكور لمساعدتها فى كتابة هذا الموضوع بـــدءًا من الاشتراك فى المؤتمر، ونيكول نوفو لترتيبه للأفكار.

الفوضى، عدم القدرة على التنبؤ والصدفة[١٠٨]

بقلم: ديفيد رويل

David RUELLE

ترجمة: د. هدى أبو شادى

نستخدم العديد من المفاهيم المتباينة لشرح العالم الذى يحيط بنا. بعض المفاهيم صلبة مثل البقرة، الحشرة، الفراشات، وأخرى مجردة مثل الفضاء، أو الزمن، أو الصدفة أو السببية. هذه المفاهيم اختراعات إنسانية: وتاريخها متصل باللغة، ومحتواها يمكن أن يتنوع من ثقافة إلى أخرى. ونحن نظن أن كلمات كالفضاء، والزمن، والصدفة، والسببية ترتبط بحقائق أولية، لا تعتمد على الحضارة وأين تعيش وحتى مستقلة عن وجود الإنسان. ولكن لابد لنا أن نعترف أن هذه المفاهيم التى قمنا بذكرها تطورت فى مجرى التاريخ، وهذا التطور يعكس تطورًا فى فهمنا لطبيعة الأشياء. فى هذه المقالة، تلعب الفلسفة والعلم دورا مهما. يدرك المثقفون منذ القدم مثلا أن الكون مهول، وهذا بفضل أعمال علماء الفلك.

وكلمات مثل "ضال" غير متوقع" أو "قليل الحدوث وغير محتمل" لها بدون شك مصدر قبل تاريخى أو حتى سابق للغة. فى الواقع، التقدير الجيد للمخاطر يمكن أن يحفظ الحياة. وكذلك إذا زمجرت الأعاصير فينبغى توخى الحذر والتواجد فى مكان مغلق. على العموم، لابد أن تتشكك من حماقات الناس والطبيعة، حماقات تعبر عن حرية الإنسان والأشياء فى التصرف فى بعض الأحيان بطريقة عشوائية وغير متوقعة.

فإذا كانت الاصطلاحات المرتبطة بالصدفة وحرية الاختيار تقدم العون الكبير فى الواقع، فيمكن أن نعتبر اصطلاح السبب أيضا مفهومًا مفيدًا: مثلا الدخان

---

(١٠٨)نص المحاضرة رقم ٢١٨ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٥ أغسطس ٢٠٠٠.

له سبب هو النار. وكذلك المد والجزر سبب وجودهما القمر وهذا شيء ليس في غاية الوضوح ولكنه معروف منذ القدم وهذه المعرفة يمكن أن تصبح مهمة. ونستطيع أيضا أن نشرح كل شيء عن طريق تسلسل الأسباب والآثار. وهكذا نستطيع أن نكون نظرة (جازمة محددة) عن الكون.

فإذا فكرنا جيدا، التحديد هو التسلسل المرتب بين الأسباب والآثار وهو المفهوم المعاكس للفظ الصدفة. سينيك (Seneque) القائم على تعليم الشاب نيرون Neron حاول شرح هذا الموضوع في كتاب "العناية الإلهية" De Providentia، وقال الآتي: "والظواهر التي نراها على أنها مشوشة وغير منتظمة مثل الأمطار، السحب، انفجارات الصاعقة.. لا تحدث عشوائيا: لها هي الأخرى أسباب". هذا التأكيد له نبتة تحديدية علمية ولكن ينبغي أن نعلم أن محتواه فوق كل شيء عقائدي. كان سينيك هاويًا للنظام، نظام مفروض بالقوانين الخالدة والإلهية. كان كل من الفوضى والصدفة تنفرانه.

وهكذا، كما قلت، كان المحتوى المرتبط بالصدفة مفيدًا عمليا وعلى مستوى المفاهيم، ونتفق أكثر مما نجني إذا ما حاولنا أن نعوض عنه بعبارات عقائدية، ومن الممكن أيضا أن نعيب المعتقدات التي تحاول إزالة الأفكار المفيدة، وهذا أيضا ينطبق على العقائدية الحديثة، في طموحها الاختزالي وعدم تقبلها التصورات الفردية.

ولنترك الآن ميدان العقائد إلى الحديث عن العلم. وبما أن اللهب سبب الدخان، فعلينا أن نسأل عالمًا كيميائيًا – فيزيائيًا متخصصًا في ظواهر الاحتراق. سوف يعلمنا أشياء مدهشة، ويبين لنا أن مسائل الاحتراق مهمة ومعقدة وأيضا غير مفهومة. في الواقع إذا كنا نهتم بمواضيع السببية والتحديد، بدلا من إمضاء حياتنا في دراسة مواضيع الاحتراق، فعلينا انتقاء موضوع أكثر سهولة. مثل حجر تم قذفه في الهواء، إذا لم يكن هناك هواء. نستطيع في الواقع وبدقة جيدة، شرح المسار الذي يسلكه الحجر في الهواء عن طريق معادلة محددة. فإذا علمنا الحالة

الأولية، أى موقع الحجر وسرعته فى بداية الحركة، نستطيع حساب الموقع والسرعة فى أى زمن آخر. وبدلا من الحجر المقذوف فى الهواء، نستطيع أن نفكر فى دراسة الباليه الرائع للكواكب والأجرام السماوية حول الشمس وحالة الحركة لسائل تعرض لبعض القوى. فى كل هذه الحالات التطور الزمنى للنظم المدروسة، أى حركتها، تتبع معادلة محددة، نستطيع القول إن الشروط الأولية للحركة هى التى تحددها بالكامل وهى سبب تطورها وهذا لابد أن يرضى لوثيوس أنيوس سينيك Lucias Annaeus Seneca.

ولقد عوضنا الآن عن مفهوم السببية بمفهوم التطور المحدد، وليس هذا بالضبط الشيء نفسه. مثلا تسمح معادلات نيوتن التى تحدد حركة الكواكب عن طريق الشروط الأولية بحساب الحالات المستقبلية للنظام الشمسى وكذلك الحالات الماضية. ونسينا أن السبب لابد أن يسبق الحدث. فى الواقع التحليل العلمى لمفهوم السببية يبين أنه مبدأ معقد وغريب. هذا المبدأ يصبح مفيدًا لأنه يمكننا من العيش فى عالم معقد وغريب، عالم لا ينبغى أن يفوتنا.

والعلم يفضل استخدام مفاهيم أكثر سهولة وغرابة، مثل "معادلة التطور المحددة". ولنوضح أن فكرة الصدفة (المصادفة) تتعارض مع مفهوم التطور المحدد الذى نعتبره سلسلة مرتبة من الأسباب والآثار، وسوف نعود فيما بعد لهذا الموضوع.

ولكننى أريد أن ألفت الأنظار (قبل الاسترسال فى الحديث عن هذا الموضوع) أن اللفظ الذى استخدمته مقترنا بمعادلة التطور (الحركة) المحددة وهو "بدقة جيدة جدا". فإذا سألتم فيزيائيًا عن معادلات التطور (الحركة) لهذا النظام أو ذاك، سوف يسألكم بدوره بأى دقة تريدونها؟ فى مثال حركة النظام الشمسى، تبعا للدقة المطلوبة، هل نضع فى الاعتبار – أو لا- تباطؤ حركة دوران الأرض بسبب أثر المد والجزر، أو إزاحة النقطة الأقرب إلى الشمس (نقطة الحضيض) لعطارد بسبب نظرية النسبية العامة. لابد لنا أن نتوقف فى مكان ما: لأننا لا نستطيع أن

نعلم حركات كل بقرة فى المرعى، أو كل حشرة على شجرة الورد. حتى ولـو أن هذه الحركات مثلا (مبدئيا) تؤثر طفيفا على حركة الأرض، باختـصار الفيزيـاء تجيبنا عن الأسئلة التى تطرح بدقة ونستطيع ملاحظتها، ولكنها ليست كاملة مطلقا. وهذا لن يحدث دون أن يكون له نتائج فلسفية، كما سنرى فيما بعد. لقد تحدثت عن معادلات التطور (الحركة) المحددة التى تبين حركة الكواكب والموائـع، الغـلاف الجوى، أو المحيطات. هذه المعادلات تلقب بالمعادلات "الكلاسيكية" لأنها لا تأخـذ فى الاعتبار ميكانيكا الكم. فى الواقع، ميكانيكا الكم نظرية دقيقة أكثر من الميكانيكا الكلاسيكية، ولكنها أكثر صعوبة فى التعامل معها. ولأن الآثار الكمية تصبح مهملة كلما كبرت النظم (حركة النجوم والمحيطات والهواء) عندئـذ تـصبح الميكانيكـا الكلاسيكية هى الحل. كما أن ميكانيكا الكم تـستخدم مفـاهيم لا يمكـن اختزالهـا للمفاهيم الكلاسيكية.

وخلافا للميكانيكا الكلاسيكية، فإن ميكانيكا الكم تأخذ فى الاعتبار الـصدفة. وفى مناقشة عن العلاقة بين التحديد والصدفة، أليس من الأصلح استخدام ميكانيكـا الكم بدلا من الميكانيكا الكلاسيكية؟

الحالة أصبحت كما يلى: الفيزياء تقترح نظريات عديدة على الأقل، والأكثر دقيقة ولها مجالات تطبيق مختلفة لنوع معين من الظواهر، يمكن تطبيـق بعـض النظريات ونستطيع اختيار ما يناسبنا (نريد): لابد أن توجد إجابة واحدة عـن كـل سؤال من الأسئلة المنطقية. عمليا، سنستخدم النظرية الأكثر سهولة فى التطبيـق. وفى الحالات التى تهمنا كديناميكا الهواء وحركة الكواكب، من الطبيعى أن نستخدم نظرية كلاسيكية. متى يمكننا التأكد من أن الآثار الكمية المهملة هى حقـا مهملـة. وأن كل التساؤلات التى سألناها هى حقا منطقية. لقد أثبـت التقـدم الفيزيـائى أن معادلات التطور المحددة صحيحة بدقة تكون غالبا رائعة وفـى بعـض الأحيـان مذهلة. هذه المعادلات هى إعادة لصياغة فكرة التسلسل المرتب للأسباب والآثـار مما يقودنا للحديث الآن عن الصدفة، وتسمح لنا محاولة صـياغة هـذا المفهـوم باستخدامه فى الوسائل العلمية.

نقول إن الحدث ينم عن الصدفة (كما نعرف) إذا حدث أو لم يحدث ونميل إلى الظن بأن عدم تأكدنا من هذا الموضوع شيء أساسي وقائم. والفائدة الأساسية لمفهوم الصدفة تكمن في وصف معرفة لا يشوبها عدم اليقين أيًا كانت مصادر المعرفة أو عدم اليقين (الحيرة).

فإذا ذكرت الآن أن جون ديوران Jean Duran عنده احتمال واحد من اثنين للتواجد في منزله، أعطي معلومة مفيدة، هذا يعني أن علي أن أحاول الاتصال به تليفونيا في منزله. ويعكس الاحتمال نصف الذي ألحقه بكون جون ديوران بداخل المنزل معرفتي بطباعه، لكن لا ينم هذا عن صفات أساسية. وبالخصوص، جون ديوران يعلم جيدا إذا كان في بيته أم لا. إذن لا يوجد تضارب في أن تُعطى احتمالات مختلفة للحدث نفسه من أشخاص مختلفين أو من الشخص نفسه عند أزمنة مختلفة. الصدفة تتناسب مع معلومة غير كاملة، يمكن أن يكون لها مصادر مختلفة.

ومنذ قرن تقريبا، أعطي هنري بوانكاريه Henri Poincare قائمة لمصادر الصدفة المحتملة. فيذكر مثلا في صالة قمار، أن عدم القدرة على التحكم العضلي المتساوي للإنسان الذي يدير لعبة الروليت يبرر التصرفات العشوائية التي تغير موقعها. ولأسباب تاريخية واضحة لم يذكر بوانكاريه ميكانيكا الكم كمصدر للصدفة، ولكنه ذكر مصدرًا للايقين تم تحليله بالتفصيل فيما بعد تحت عنوان "الفوضى" Chaos والذي سنقوم بذكره الآن.

ولنأخذ نظامًا فيزيائيًا في الاعتبار، يوصف التطور الزمني له بمعادلات محددة. فإذا عرفنا حالة النظام في الزمن الأولى، وهذا اختياري، نستطيع حساب حالته في وقت لاحق. لا يوجد أي عدم يقين، أو صدفة، ولكننا سنتخيل ضمنيا أننا نعلم الحالة الأولية بدقة متناهية، في الواقع لا نستطيع أن نقيس الحالة الأولية إلا بدقة محدودة (بينما المعادلات المحددة التي نستخدمها لا تمثل التطور الحالي للنظام الفيزيائي الذي نهتم به إلا تقريبا). ينبغي إذن أن نرى كيف أن القليل من عدم الدقة

فى معرفتنا بالحالة الأولية فى الزمن $t = 0$ سيؤثر على تنبؤاتنا عن حالته اللاحقة فى الزمن t. نتوقع أن عدم تأكد بسيط فى الزمن $t=0$ سيؤدى إلى عدم تأكد صغير أيضا فى الزمن t. ولكن السؤال الضرورى هو كيف يعتمد عدم التأكد على الزمن t. لقد علمنا أن لكثير من الأنظمة العشوائية (الفوضوية) عدم التأكد يتغير سريعا، بطريقة أسية مع الزمن. هذا يعنى إذا اخترنا وهلة من الزمن T يكون الخطأ فى أثنائها مضروبًا فى اثنين، ويصبح الخطأ فى الزمن 2T مضروبًا فى 4 وفى الزمن 3T مضروبًا فى 8 وهكذا دواليك. وفى الزمن 10T يصبح الخطأ مضروب فى 1024 وفى الزمن 20T يصبح الخطأ بمقدار مليون وفى الزمن 30T بمقدار مليار.. وهكذا يصبح عدم التأكد فى دقتنا شيئًا غير مقبول. تُلقب ظاهرة التكاثر السريع - للخطأ فى التنبؤ لنظام فيزيائى - بالفوضى أو العشوائية، مما يدخل الصدفة فى شرح النظام الفيزيائى، حتى لو أن هذا النظام يوصف بمعادلات تطور محددة بالكامل مثل معادلات ديناميكا الموائع أو حركة الكواكب.

وهذا ما قاله هنرى بوانكاريه فى فصل عن الصدفة من كتابه "العلم والوسائل" المنشور سنة ١٩٠٨:

"سبب صغير، لا نأخذه فى الاعتبار، يحدد أثرًا ملموسًا لا نستطيع التغاضى عنه، وهكذا نقول إن هذا الأثر سببه الصدفة". ويؤكد بوانكاريه ذلك بمثل اقتبسه من علم الأرصاد الجوية: "لماذا يجد علماء الأرصاد الجوية صعوبة فى التنبؤ بالزمن بدقة كافية؟ لماذا تسقط الأمطار، وتأتى الزوابع كما نرى بالصدفة، حتى يرى بعض الناس أنه من الطبيعى أن يصلوا من أجل الأمطار أو الجو الصحو؟ ويحكموا على فكرة الصلاة للخسوف بالشيء الهزلى؟ ونرى أن الاضطرابات الكبرى تتولد عموما فى مناطق يكون فيها الجو فى توازن غير مستقر، سوف تتولد زوبعة فى مكان ما؛ ولكن ليس العلماء فى موقع يؤهلهم لذلك؛ بسبب عشر درجة بالزيادة أو النقصان فى نقطة ما ينطلق الإعصار هنا وليس هناك ويبسط أضراره على البقاع التى يجتاحها. لو كنا نعرف هذه الدرجات العشر لاستطعنا أن

نتنبأ للأمام، ولكن الرصد لم يكن محكما أو دقيقا، مما يؤدى كل ذلك إلـــى دخـــول الصدفة".

لقد تعددت تأكيدات بوانكاريه عن الأرصاد الجوية؛ كما ينبغى أن نعترف، ما كان يسمح العلم بتحقيقه فى بداية القرن العشرين. تم إثبـــات بـــديهيات بوانكاريـــه العملاقة وسنجد بدون مشقة بعض أفكار لعلماء آخرين تبين خطؤها. لقد كان شيئا مفرحا حقا أنه بعد أن ظلت أفكار بوانكاريه فى طى النسيان، تمت إعادة اكتشافها، وتحليلها علميا. هذه الحقبة الجديدة بدأت بمقال للورانز Lorenz بالنسبة للأرصـــاد الجوية سنة ١٩٦٣، ومقالة لتاكينز Takens ولى عن الاضطراب الـــدوامى ســـنة ١٩٧١، ثم ظهرت أعمال كثيرة فى السبعينيات والثمانينيات والتـــسعينيات تعـــضد النظرية الحديثة للفوضى. ظهرت كلمة الفوضى نفسها بمعناها التقنى سنة ١٩٧٥. يمكننا فقط إعطاء رؤية ملخصة جدا على الخصائص التقنية لنظريـــة الفوضـــى، وأؤكد أن النتائج التقنية غاية فى الأهمية.

هذه النتائج تسمح بتغيير الاتفاق على المفاهيم المتعارف عليها والتى يتبعها " أسباب صغيرة تؤدى إلى آثار كبيرة " باتفاق كمى مثل التى تخص " أثر الفراشة " Effet papillon الذى سنتحدث عنه فى لحظات.

تدرس نظرية الفوضى بالتفصيل كيف يؤدى تقدير غير مؤكد عـــن الحالـــة الأولية لتطور زمنى محدد إلى عدم تأكد فى التنبؤات يتضاعف سريعا مع الـــزمن. فنقول يوجد "اعتماد حساس على الشروط الأولية". هذا يعنى أن أســـبابا صـــغيرة يمكن أن تؤدى إلى آثار كبيرة، ليس فقط فى حالات خاصة ولكن لكـــل الـــشروط الأولية. باختصار، تمثل كلمة فوضى الحالة التى يتضاعف فيها عدم التأكـــد مـــن التنبؤات مع الزمن سريعا عند شروط أولية معينة.

ولنعط مثالا على ذلك: يسقط شعاع من الأشعة الضوئية المتوازية على مرآة محدبة وبعد الانعكاس يصبح لدينا شعاع ضوئى متباعد، فإذا كان الشعاع الأولـــى متباعدًا سيصبح ناتج الانعكاس من المرآة المحدبة أكثر تباعدا، أما إذا كـــان لـــدينا

بدلا من الشعاع والمرآة كرة بلياردو ترتد بمرونة من حائل محدب يصبح لدينا الحالة الهندسية نفسها وندرك عندئذ أن عدم تيقن صغير عن مسار الكرة قبل الاصطدام يؤدى إلى عدم تيقن أكبر بعد الاصطدام فإذا تواجدت عدة حوائل محدبة تصطدم بها الكرة بطريقة مكررة يزيد عدم اليقين بطريقة أسية ونحصل على تطور زمنى فوضوى. كان هذا المثال معروفا عن بوانكاريه، وظل هكذا زمنا حتى تم حله بطريقة رياضية معقدة على يد سيناى Sinai. وتعتبر الدراسة الرياضية للنظم الفوضوية غاية فى الصعوبة لأن دراسة الفوضى تجمع بين ثلاث تقنيات: الرياضيات وتمثيل الواقع الرياضى على الحاسوب والتجريب المعملى أو الرصد (الجو، الكواكب). ولم يعاصر بوانكاريه التمثيل الرياضى على الحاسوب. لعب هذه التمثيل الرياضى دورا أساسيا فى إظهار حساسية النظم المحددة (حتى لو كانت قليلة التعقيد) تجاه الشروط الأولية. الفوضى إذًا ظاهرة مستشرية.

ويشكل علم الأرصاد الجوية تطبيقًا مثاليا عن أفكار الفوضى. وفى الواقع لدينا نماذج طيبة تشرح ديناميكا للجو الأرضى والدراسة للحاسوب تبين أن هذه النظم فوضوية، فإذا غيرنا قليلا فى الشروط الأولية، يصبح التنبؤ بعد بضعة أيام مختلفًا تماما أو يصل إلى حد يفشل فيه النموذج. من المعروف أن التنبؤات المجراة بهذه النماذج تنعقد عن الواقع المرصود بعد بضعة أيام، ونعلم الآن السبب: تَحُد الفوضى من قدرتنا على التنبؤ بالزمن الذى ستأخذه. عالم الأرصاد الجوية إى دى لورنز Ed Lorentz، الذى تحدثنا عنه من قبل، أحاط العامة بمبدأ الحساسية تجاه الشروط الأولية تحت مسمى " أثر الفراشة ". شرح فى مقالة جماهيرية كبيرة كيف أن خفقان أجنحة فراشة يمكن أن يكون له أثر معين على الجو فى الأرض كلها بعد بضعة أشهر من حدوثه، وقد يؤدى إلى حدوث عاصفة مدمرة فى منطقة بعيدة. ويذكرنا هذا بما كتبه بوانكاريه ولكنه مثال مبالغ فيه يجعلنا نتساءل هل ينبغى لنا أن نعطى لأثر الفراشة قيمة أكبر من القيمة البلاغية. وسوف نعرف فيما بعد أن التأكيد الذى قام به لورنز أعلاه صحيح. سوف نعتبر الحالة التى ترفرف فيها الفراشة بجناحيها عبارة عن اضطراب بسيط لحالة سكون الفراشة.

ونستطيع حساب أثر هذا الاضطراب عن طريق استخدام الصفات الفوضوية لديناميكا الجو (لنتذكر أن النماذج عن الجو الأرضـي تظهـر طبيعـة ديناميكيـة فوضوية على مقياس كبير، على المقياس الصغير، يوجد أيـضا فوضـي بـسبب الاضطرابات الدوامية العامة للهواء الذى يغمرنا، وسوف يتزايد الاضطراب الـذى تسببت فيه الفراشة أسيًا، أى بطريقة سريعة جدا، ونستطيع أن نقتنع أنه فى خـلال عدة أشهر ستتغير الحالة الجوية الأرضية فى كل شيء وعن كل شـيء، وتجتـاح العاصفة المناطق البعيدة عن مكان الفراشة.

ويحرضنى الحذر أن آخذ بضعة تحفظات حقيقية. ينبغى لنا أن نتجنـب أن يؤدى الشك فى نقطة من التفاصيل إلى التقليل من أهمية الاسـتنتاجات المؤكـدة. ونستطيع أن نتساءل كيف تنتشر الاضطرابات التى تحدث علـى مقيـاس صـغير (كمقياس الفراشة) لتصيب المقاييس الكبرى مثل الإعصار.

فإذا حدث الانتشار بطريقة سيئة أو غاية فى السوء، هل يمكن أن نحتاج إلى عدة أشهر حتى تؤدى رفرفة أجنحة الفراشة إلى إعصار هنا أو هناك. سيجعل هذا أثر الفراشة أقل تشويقا. فى حقيقة القول، تظل الاضطرابات الدوامية التى تحـدث غير مفهومة ويظل استنتاج لورنز إذن غير مؤكد قليلا. صورة الفراشـة جميلـة سيصبح من المؤسف حقا أن ندفنها وإلى أن نكتسب معلومات أكثر تقلل من قيمتها سوف أظل شخصيا مرتبطة بها، ومهما تكن الدورة العامة للجو لا يمكن التنبؤ بها لعدة أشهر مقبلة، إنها حقيقية مثبتة: يمكن لإعصار أن يقوم بها أو بطريقـة غيـر متوقعة ولكن هذا سيعتمد على عدم يقين آخر غير رفرفة أجنحة الفراشة.

فإذا فكرنا لوهلة، نرى أن قيام العاصفة فى مكان ما وفى وقت ما ينتج مـن عدد لا يحصى من العوامل التى حدثت منذ أشهر أيًا كانت العوامل؛ فراشة ترفرف بجناحيها؛ كلب يهز ذيله، أشخاص يعطسون أو أى شيء يرضيكم. وهنـا أصـاب مفهوم السببية التخفيف حتى فقد معناه. لقد فقدنا فى الواقع السيطرة على مجموعـة من الأسباب التى فى لحظة ما تتسابق على أن تحدث زوبعة أو لا تحدث، الآن أو

بعد بضعة أشهر. هل كان ينبغي علينا أن نأخذها في الاعتبار؟ من الواضح أن هذا ممكنا، يمكن أن يصبح أثر هذه الاضطرابات مهما بعد عدة أشهر لكن هناك حائطًا من عدم القدرة على التنبؤ يمنعنا من رؤيته.

وأريد العودة للحديث باختصار عن تورطي الشخصي في طريق الفوضـــى. في نهاية الستينات كنت أهتم بدراسة ديناميكا الموائـــع Dynamique des fluides، وهو علم تدفق الموائع. بعض حالات التدفق التـــي رصـــدناها هادئـــة ومنتظمـــة ونسميها الانسياب الطبقي والأخرى مضطربة وغير منتظمة ونسميها الاضـــطراب الدوامي. ولم ترضني تفسيرات الاضطراب الدوامي التي وجدتها في كتاب لانـــداو وليفشيتز Landau and Lifschitz عن الهيايدروديناميكا، لأنها لم تأخذ في الاعتبار ظاهرة رياضية جديدة علمت عنها من خلال أعمال سيميل Semale.

ما هذه الظاهرة؟ تُرى هذه الظاهرة في عدد كبير من التطـــورات الزمنيـــة ذات الطبيعة الغريبة، التي لها حساسية تجاه الشروط الأوليـــة. وهكـــذا أصـــبحت مقتنعة أن الاضطراب الدوامي مرتبط بديناميكا "غريبة". اقترحت في مقالة مشتركة بيني وبين تاكينز أن الاضطراب الدوامي الهيدروديناميكي لابد أن يمثل بجوانـــب غريبة أو فوضوية وأنه لابد من دراسة بداية الاضطراب الدوامي، أو الاضطراب الدوامي الضعيف. وقامت فيما بعد أعمال تجريبية عديدة بتأكيد هذا التحليـــل. ولا يحل هذا مشكلة الاضطراب الدوامي، التي تظل من أصـــعب مواضـــيع الفيزيـــاء النظرية ولكننا نعرف على الأقل أن النظريات "غير الفوضوية" لا تستطيع أن تقدم لنا شيئًا.

البعض من هذه الأعمال طور عوامل تقنية عن نظرية الفوضى ولن نستطيع الحديث عنها هنا. البعض الآخر حلل فصائل مختلفة من الظواهر الطبيعيـــة علـــى أمل إيجاد تصرف فوضوى، وهكذا اقترحت أنه لابد أن تكـــون هنـــاك تـــرددات كيميائية فوضوية، وهذا ما تم تأكيده بالتجربة فيما بعد. وكانت هذه الحقبة خصبة، فكنا كلما فكرنا قليلا استطعنا إبداع اكتشافات لها اهتمامات ممتدة. وكل الأفكار لـــم تكن بالطبع جيدة أو مقنعة وسوف أتحدث عنها فيما بعد.

استطاع ويزدوم Wisdom ولاسكر Laskar أن يحققا نجاحا فائقــا عنــدما بحثا عن الفوضى فى حركة النظام الشمسى.

اعتقدنا منذ زمن بعيد أن حركــة الكواكــب والأرض بالــذات لا تــشوبها الفوضى لأننا نستطيع أن نحسب الكسوف، أو نعلم الظواهر التى حدثت منــذ آلاف السنين وندرك الآن أن هذا غير صحيح.

تتغير بارامترات مدار الأرض البيضاوى ببطء مع الزمن وبالــذات موقــع المراكز (يوجد مركزان للشكل البيضاوى) يتغير بطريقة فوضوية. وهنا نعلــم أن حركة الأرض لا يمكن التنبؤ بها. والزمن اللازم لتضاعف الخطأ في التنبــؤ فــى حدود خمسة ملايين سنة ، وهذا زمن طويل جدا بالنسبة لعمر الإنسان ولكنه قصير بمقياس علم الجيولوجيا. فالفوضى التى وجدناها فى النظام الشمسى ليست إذا بدون أهمية، وتتلاحق الأعمال فى هذا المجال بنشاط لكن الوقت لا يتسع للحديث عنها.

وأعطتنا النتائج التى تراكمت عندنا منذ عشرات السنين فهما جديــدًا لــدور الفوضى فى علم الأرصاد الجوية والاضطراب الدوامى الضعيف، وديناميكا النظام الشمسى. وماذا إذن عن البيولوجيا والاقتصاد والتجارة والعلوم الإنسانية؟ لابــد أن نتفهم أن النماذج المفيدة فى المجالات الحية مختلفة جدا عن التى ترضينا فى النظم الفيزيائية السهلة. فالعلاقات التى تحدث مصادفة والضرورية لها طبيعة أخرى. فى الواقع المجال الحى يتصف بالاستقرار الداخلى حتى يبقى الكائنــات الحيــة فــى ظروف مناسبة للحياة. فالاستقرار الداخلى يميل إلى الاحتفــاظ بــدرجات حــرارة أجسامنا فى حدود معينة حتى تحول دون الاضطرابات الحرارية، ومن ثــم فلهــا طبيعة غير فوضوية وكذلك يظهر تصحيح الاضطرابات على مستوى التــصرفات الشخصية: كمشروع للسفر يظل قائما حتى مع حدوث عطل بالعربة أو إضــراب فى وسائل المواصلات يجعلنا نغير وسيلة سفرنا. إننا نتحدث عن نظام تعديلى معقد وسيكون من الصعب أن نمثله بنماذج ديناميكية بسيطة نستطيع أن نطبــق عليهــا نظرية الفوضى. ومن الواضح أن بعض الأسباب الصغيرة يمكن أن تؤدى إلى آثار

كبيرة فى الحياة اليومية. وهناك آليات مسببة للفوضى عند إضافة آليات أخرى مصححة للفوضى إليها يصبح من الصعب أن نتحكم فى الديناميكا الناتجة عنها.

وفى مجال الاقتصاد والتجارة أو التاريخ، نرى أيضا أن الأسباب التافهة يمكن أن تؤثر تأثيرات مهمة. فمثلا التقلبات الجوية يمكن أن تؤدى إلى الجفاف فى منطقة وتترك السكان فى حالة مجاعة. ولكن هناك آليات مصححة يمكن أن تزيل أثر المجاعة ويكمل التاريخ طريقه الجليل. ربما، ولكن هذا ليس مؤكدا فمثلا حرب مظلمة قامت فى أفغانستان أدت إلى سقوط الإمبراطورية السوفييتية العظمى. وتسابقت هذه الحرب مع عدة أسباب مظلمة أخرى على تقويض إمبراطورية أصبحت غير مستقرة أكثر مما نعتقد. فى الواقع نحن نعيش فى عالم غير مستقر إجماليا فسرعة التنقل والبث اللحظى للبيانات والمعلومات وعولمة الاقتصاد، كل هذا يمكن أن يحسن من ظروف المعيشة الإنسانية ولكنه يجعل المجتمع غير مستقر وهذا على مقياس الكوكب. فمثلا وباء فيروسى جديد أو فيروس معلوماتى أو أزمة مالية نحس بأثرها فى كل مكان مباشرة اليوم كالأمس، ويبقى مستقبل كل رجل وكل أمرأة شيئا غير مؤكد ولكننا لم نتأثر دون شك بعدم قدرتنا على التنبؤ بالمستقبل على مستوى الإنسانية جمعاء.

المادة المضادة موجودة، لقد التقيت بها[١٠٩]

بقلم: كاثيرين ثيبولت

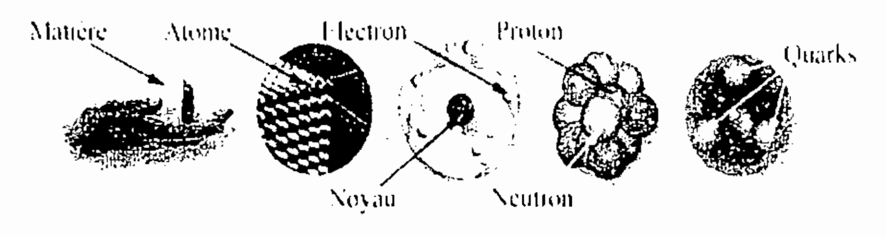
Catherine THIBAULT

ترجمة: د. هدى أبو شادى

"المادة المضادة موجودة، لقد التقيت بها" هذا العنوان المثير اختياريا لـه هدف، هو أن المادة المضادة ليست أسطورة ولكن حقيقة. فى الواقع من الممكن أن نكشف المادة المضادة ونصنع منها أشعة أو محاصرتها فى فخاخ لرصدها كيفما شئنا.

المادة ومركباتها

"المادة المضادة"، ابتكر هذا المسمى ليعارض مسمى المادة ولكن ما هى بالضبط المادة؟ يرد علينا القاموس اللغوى بأن المادة هى ما تتكون منها الأشياء. تتكون أجسادنا من المادة والأرض التى نعيش عليها مصنوعة من المادة والشمس والكواكب أيضا صور لمكونات المادة.



الشكل (١)

صورة لمكونات المادة عن سيرن CERN

---

(١٠٩) نص المحاضرة رقم ٢١٩ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٦ أغسطس ٢٠٠٠.

وبالاقتراب من قلب المادة بفضل المكبرات التى تصبح يوما بعد يوم أقــوى فى حالة بلورة السليكون مثلا نرصد ما فى الرسم (١) على التوالى كالآتى:

- البلورة مكونة من ذرات كلها متشابهة ومرتبطة بطريقة منتظمة.

- كل ذرة مكونة من نواة كثيفة لها شحنة كهربائية موجبة. للسليكون +١٤ يدور حولها سحابة من الإلكترونات -e، لكل لكترون شحنة سالبة وتصبح الــذرة متعادلة ويحدد عدد اللكترونات الخواص الكيميائية. وتحتــوى ذرة الــسليكون على١٤ إليكترونًا بينما تحتوى ذرة الهيدروجين على إليكترون واحد والأكسجين ٦ واليورانيوم ٩٢.

- النواة نفسها مكونة من جسيمين: البروتون p Proton الذى يحمل الشحنة الموجبة، والنيوترون n Neutron المحايد وتملــك ذرة الــسليكون ١٤ بروتونًــا. وتتنافر البروتونات لأن شحنتها واحدة مما لا يسمح بوجــود أنويــة مكونــة مــن البروتونات فقط ما عدا حالة الهيدروجين الذى له بروتون واحــد. وتظــل النــواة متماسكة بفضل التفاعل القوى بين البروتونات والنيوترونات. وكــذلك لا تتواجــد الأنوية المكونة من البروتونات فقط. إذًا لابد من وجود رقم محدد من البروتونــات والنيوترونات. ولذرة السليكون ثلاثة نظائر مــستقرة ٢٨، ٢٩، ٣٠ طبقــا للعــدد الكامل للبروتونات والنيوترونات (عــدد النيوترونــات الموجــودة بهــا ١٤، ١٥، ١٦نيوترونًا).

- ويتكون كل بروتون ونيوترون مــن مكونــات أكثــر صــغرا نــسميها الكواركات Quarks. كل منهما مكون من ثلاثة كوراكات، فللبروتــون كواركــان فوق وكوارك واحد تحت، أما النيوترون فله كواركان تحت وكوارك واحد فــوق. نظن فى الواقع أن المادة المستقرة التى تصنع أجسادنا مكونــة فقــط مــن ثلاثــة مركبات: الإلكترونات وكواركات فوق وكواركات تحت. ونحن متأكدون مــن أن الكواركات لا تتجزأ هى الأخرى.

بداية المادة المضادة

في نهاية القــرن الرابــع عــشر وبفــضل جــيمس كــلارك ماكــسويل (James Clerk Maxwell) تم وضع نظرية الكهرومغناطيسية التى استقرت عــن جدارة. تصف هذه النظرية الإلكترون الذى له سرعة ضعيفة كما نراه فى الظواهر الكهربائية. وظهرت فى بداية القرن العشرين مــشكلتان وضــعتا صــلاحية هــذه النظرية قيد الشك. فى سنة ١٩٠٦ وضع أينشتين نظرية النسبية الخاصة وبــين أن قوانين نيوتن لا تصلح للنظم التى تتحرك بسرعات تقترب من سرعة الضوء. ثــم ظهرت ميكانيكا الكم سنة ١٩٢٦على يــد وولفجــانج بــاولى Wolfgang Pauli وفرنرهــايزنبرج Werner Heisenberg وأخيــرا إيــرفين شــرودينجر Erwin Schrödinger الذى أشار إلى أن للإلكترونات دورانا مغزليًا قــدره +½ أو −½، هذا الدوران المغزلى يمكن أن يصاحب مفهوم حركة دوران الإلكترونات وشرحت معادلات شرودينجر سلوك الإلكترون مع أخذ الآثار الكمية فى الاعتبار ولكن عند سرعات ضعيفة صغيرة فقط.

واستطاع فيزيائى شاب إنجليزى اسمه بول ديراك Paul Dirac أن يجد حلاً لهذه المشكلة وأن يوجد معادلة تصف الإلكترون كميا وفى الوقت نفسه عند سرعة كبيرة تقترب من سرعة الضوء. أعطانا هذه النتيجة منذ سنة ١٩٢٩ حــين كــان عمره ٢٧ عاما. ولكن حل المعادلة كان له إجابتان. السؤال الذى أثار الجدال فــى ذلك الوقت كان السعى إلى معرفة هل الحل الثانى يمثل نوعا آخر من الجــسيمات وإذا كان نعم فما هو؟

فإذا كانت شحنة الجسيم الآخر سالبة مثل الإلكترون وطاقته سالبة فليس لهذا معنى فيزيائى. لابد إذن أن يكون الجسيم مشحونا شحنة موجبة. وكان البروتــون الجسيم الوحيد الموجب المعروف آنذاك. لكن هذا الجسيم كتلته ٢٠٠ مرة أصــغر من البروتون. عرض هذه الفرضية الكثيرون مثل هايزنبرج وبــاولى وأوبنهــايمر Oppenheimer الذين ظنوا أن تماثل المعادلتين لابد وأن يؤدى إلــى تــساو فــى

الكتل. فإذا كانت المعادلة الثانية تناسب جسيمًا حقيقيًا فلا يمكن أن يكون إلكترون ولكن إلكترونًا مضاد +e له كتلة الإلكترون نفسها وشحنة معاكسة.

وكان الجدال هنا على الطرف الآخر من العالم حيث أتى عالم فيزيائى شاب اسمه كارل أندرسون Carle Anderson باكتشاف فضولي عند دراسته الأشعة الكونية التى لها طاقات عالية. واستخدم حجرة ويلسون Wilson موضوعة بداخل مجال مغناطيسي يحني المسارات فى اتجاه أو آخر طبقًا لشحنة الجسيم لكى يرى الجسيمات المشحونة. رصد أندرسون عددًا كبيرًا من الإلكترونات وأطلق على البعض منها اسم البوزيترون Positron لأنها اتخذت مسارا معاكسًا للإلكترونات وكانت شحنتها موجبة. عند نشر هذه التجربة سنة ١٩٣٢ كانت الظاهرة نفسها قد رصدت في كافندش Cavendishعلى يد بلاكيت Blackett وأوكياليني Ochiallini ولكن الآخرين لم يجرءوا على نشر أعمالهم دون التأكد منها بعناية. هذا ما فعله أندرسون في سنة ١٩٣٣ بعد أن قدم عدة اقتراحات منها أن هناك زوجًا من الإلكترونات الموجبة والسالبة. فيما بعد ظهر أن البوزيترون الذى اكتشفه أندرسون لم يكن إلا إليكترونًا مضادًا، وهكذا حصل ديراك سنة ١٩٣٣ على جائزة نوبل وحصل أندرسون عليها سنة ١٩٣٦.

وبعد هذه الاكتشافات الرائعة وجب علينا السؤال عن وجود الشركاء المضادين لكل الجسيمات الأخرى مثل البروتون والنيوترون ولهم الكتلة نفسها وشحنات مختلفة. يتحكم فى تولد واختفاء المادة المضادة قانون آينشتين الشهير $E=MC^2$ الذى يشرح احتمال تحويل الطاقة E إلى كتلة M والعكس صحيح حيث C سرعة الضوء. يتولد الجسيم والجسيم المضاد فى أزواج: زوج يولد وزوج يختفى، فحالما يتولد الجسيم المضاد في بيئة ما يجد بسرعة شديدة شريكًا يزيله. وتتحول الطاقة إلى فوتونات لا أى أشعة ضوئية.

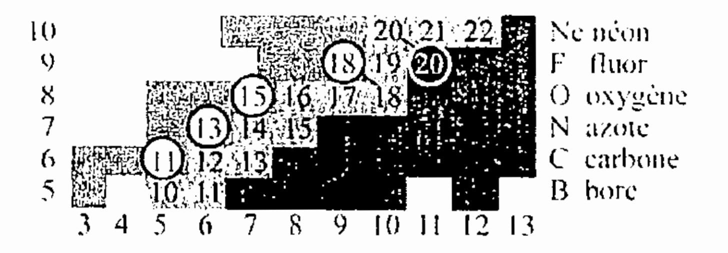
لتوليد بروتون مضاد $\bar{p}$ أو نيوترون مضاد $\bar{n}$ ينبغى تكوين زوج من p-p أو n-n. ويعتبر هذا أكثر صعوبة من الزوج e^{-}-e^{+} لأننا نحتاج لطاقة أكبر ٢٠٠٠

مرة. ثم دخلت أمريكا فى هذه المغامرة التى كللت بعد ٢٣ عاما بالنجــاح بفــضل البيفاترون bevatron المقام فى بيركلى بكاليفورنيا. واكتشف فيما بعــد البروتــون المضاد $\bar{p}$ سنة ١٩٥٥ والنيوترون المضاد $\bar{n}$ سنة ١٩٥٦، مما أهل شــامبرلين Chamberlain وسيجريه Segre سنة ١٩٥٩ للحصول على جائزة نوبل. وثبت ما اقترحه النظريون أن لكل جسيم جسيمًا مضادًا إلا فــى حالــة الفوتــون الفريــدة، فجسيمه المضاد هو نفسه.

وفى السبعينيات رصدت الأنوية التى لها $\bar{p}$ و $\bar{n}$ فى الحجــرات الفقاعيــة الموضوعة فى مسار أشعة من البروتونات التى لها طاقات عالية فــى بروكهــافن (الولايات المتحدة) وسيربووف (الاتحاد السوفييتى)، وفى سيرن (سويسرا). وأخيرًا عام ١٩٩٥ تم تصنيع تسع ذرات هيدروجين مضادة (بروتون مضاد يدور حولــه بوزيترون). وتصنيع البروتونات المضادة أصعب بكثير من تصنيع أنوية مــضادة لأن علينا أن نضع البوزيترون فى مدار. كما لو أننا أسرنا عربة ســباق لنجبرهــا على العمل كعربة الأحصنة الخشبية لن تحيا هذه الذرات المضادة أكثر من واحــد على مليار من الثانية أو ما يزيد منذ اكتشافها إلى زوالها.

المادة المضادة والطب

تم اكتشاف البوزيترونات فى الأشعة الكونية، ووجد أنها تبــث أيــضًا مــن بعض الأنوية المشعة. نظائر السيليكون لها ١٤، ١٥ أو ١٦ نيوترونًا. يبين الرســم البناء المستقر لأنوية لها من ٥ إلى عشرة بروتونات.



الشكل (٥)

مقطع من جدول الأنوية يبين الأنوية المستقرة باللون الرصاصى الفاتح
والأنوية التى بالأسود + β و -β باللون الرصاصى الغامق تبث أشعة

فإذا كان للنواة عدد زائد من النيوترونات، كالفلور ٢٠، سيتحول واحد من هذه النيوترونات إلى بروتون.

$$n \rightarrow p + e^{-} + \overline{\nu}_e \quad \text{أو} \quad {}^{20}\mathrm{F} \rightarrow {}^{20}\mathrm{Ne}$$

ويعتبر الإشعاع β^{-} الأكثر شيوعًا و $\overline{\nu}_e$ هو النيوترينو المضاد المصاحب لـ e^{-} واكتشافه صعب لأنه يتفاعل قليلاً مع المادة.

فإذا لم يكن للذرة عدد كافٍ من النيوترونات كالفلور١٨ يتحول واحد من البروتونات إلى نيوترون.

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu_e \quad \text{أو} \quad {}^{18}\mathrm{Fe} \rightarrow {}^{18}\mathrm{Ne}$$

ويتم هكذا إنتاج البوزيترونات ويعتبر الكاربون١١ Carbon، والأزوت١٣ Azote، والأكسيجين ١٥ Oxygene، والفلور ١٨ Fluor من مصادر إشعاع بيتا الموجب +β حيث تتراوح أنصاف أعمارهم ما بين بضع دقائق إلى ساعتين (الزمن اللازم لتحلل نصف الذرات). ومن الممكن إنتاج البوزيترون عن طريق سيكلوترون صغير وإلحاقه بجزئيات مناسبة. فإذا تم حقن هذه الجزيئات المضاف إليها أشعة بيتا الموجبة +β بداخل جسم الإنسان، يقوم البوزيترون المنبعث فورا بالالتقاء بإلكترون من الوسط المحيط ويزيل أحدهما الآخر

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow 2\gamma$$

يكون هذا الزوج اثنين من الفوتونات لهما طاقة تكافئ 511 KeV بالضبط ما يعادل كتلة الإلكترون أو البوزيترون ويفترقان فى اتجاهين مختلفين ويخرجان من الجسم حيث يتم اكتشافهما لحظيا. عن طريق الكشافات الموجودة يمكن أن نحدد مواقع الجزيئات المشعة فى الفضاء. ويسمى هذا بمبدأ الـ (PET) أو الرسم الفوتوجرافى عن طريق انبعاث البوزيترونات positron emission by tomography.

والجزىء المستخدم عادة هو الفلورو- دى ذوكسى- جلوكوز Fluoro - Deoxy - Glucose الذى يحتوى على فلور ١٨ (نصف حياته ١١٠ دقائق). ويستقر الجلوكوز على الأورام السرطانية وعلى بعض الأعضاء وتمتصه بعض أجزاء المخ النشطة.

وترتبط الاستخدامات العديدة للـ (PET) بثلاث مزايا: حساسيتها، وعدم إيذائها للمريض، وسرعة استجابتها فى الوقت الحقيقى. أما فى الطب فتستخدم هذه الطريقة لمتابعة حالات مرضى السرطان. وتسمح فى الأبحاث الطبية بدراسة وظائف المخ وعمل مختلف المناطق به (الصرع، باركينسون،...) الدورات الصغرى والميتابوليزم القلبى، أو للرئة أو للكلى أو الصفات المميزة للمستقبلات أو التوصل إلى عمل جين.

وفى العلاج ضد السرطان ابتكرت طريقة جديدة للعلاج الإشعاعى باستخدام أشعة +β فى دار مشتادت Darmstadt فى ألمانيا. وتم تدمير الأورام بعد قذفها بأيونات الكربون المعجلة بسرعة تقترب من سرعة الضوء.

هذه الأيونات لها خصائص تدمير الموجة عند نهاية مسارها وفى نقطة معينة، ويمكن أن تتفاعل مع الوسط العام بفقد نيوترون عندئذ يتحول الكربون المستقر إلى كاربون ١١ مشع لـ +β، نستطيع أن نحدد مكانه عن طريق التصوير المقطعى.

وهكذا نستطيع التحكم فى تطابق المنطقة المدمرة بالضبط مع الورم المشاهد ومنذ ١٩٩٧، تم علاج ٦٧ مريضًا بنجاح.

وجهاز للفيزيائيين

حتى الآن لم يتم إلا تحضير جسيمات المادة المستقرة فقط. يوجد العديد من الجسيمات الأخرى. كتلتها غاية فى الثقل ومدة حياتها وجيزة. أصابت بعض الاكتشافات التى تمت بالمصادفة الفيزيائيين بحيرة. والأخرى تم التنبؤ بها على يد النظريين وينبغى أن نتأكد من وجودها لكى نقر بوجودها أو عدمه. والمشكلة بالنسبة للتجريبيين أنه كلما ازدادت كتلة الجسيمات كلما احتجنا إلى طاقة أكبر لتكوينها (لتوليدها). والطامة الكبرى، أنه طبقًا للنسبية الخاصة إذا ما عجلنا جسيمًا بسرعة تصل إلى سرعة الضوء ليصطدم بهدف ثابت، لا ننال إلا قسطًا صغيرًا من الطاقة الحركية.

فلن نستطيع أن نحول من طاقة البروتون التى مقدارها ٢٠٠ GeV إلا طاقة مقدارها GeV٢٠ تقريبا إلى كتلة. وفى المقابل عند حدوث اصطدام متواجه، تتحول كل الطاقة الحركية إلى كتلة: فعندما يتصادم جسمان كل له GeV200 وجهًا لوجه ينتج عنهما. GeV400 فى معجل على شكل حلقة، تنحنى المسارات بفضل المجالات المغناطيسية. ومن الممكن أن نجعل الجسيم والجسيم المضاد يدوران فى اتجاهين متقابلين، أو فى اتجاه واحد أو فى مسار دائرى، أو ترتيب الالتقاء بينهما. عندنا إذا مصادم collisioneur بنفس ثمن المعجل accelerateur.

تم تحقيق التصادمات الأولى التى تستخدم المادة المضادة باستخدام البوزيترونات السهلة المنال عن طريق انبعاث أشعة بيتا الموجبة β+ والإلكترونات. ولقد ساعد هذا على اكتشاف الكثير من الجسيمات. وفيما بعد تم استخدام مصدر للبروتونات المضادة فى سيرن Cern عن طريق قذف هدف ثابت ببروتونات لها طاقة مقدارها حوالى GeV٢٥. بروتون واحد من كل ألف يُوَلد

زوجًا من البروتون – البروتون المضاد. تنتقى وتخزن هذه البروتونات المضادة فى حلقة يكون قطرها عشرات الأمتار فى معظم الأحوال. ولسوء الحظ سوف نحصل على واحد فقط من البروتونات المضادة ، بالضبط كالصعوبة التى يواجهها طفل عندما يحاول ملء زجاجة بالماء عند اقترابه من رشاش المياه الذى يسقى العشب. وبعد تخزين البروتونات المضادة نستخرجها عند الطلب ونستطيع حقنها فى المصادمات بنفس طريقة البروتون ولكنها سوف تدور فى الاتجاه العكسى.

وهكذا اكتشف كارلو روبيا Carlo Rubia سنة ١٩٨٣ الجسيمات الحاملة للتفاعلات الضعيفة، المسماة +W و-W، Z٠ لها كتلة فى حوالى الـ GeV٩٠ وكان قد تنبأ بها العلماء النظريون. هذا الاكتشاف أهله للحصول على جائزة نوبل سنة ١٩٨٤ وكذلك لسيمون فان ديرمير Simon Van der Meer الذى كان الصانع الماهر الأساسى لمخازن البروتونات. وحديثًا فى فرمى لاب بالولايات المتحدة بالقرب من شيكاغو، مصادم من النوع نفسه سمح لنا باكتشاف كوارك القمة، الكوارك السادس ذو الكتلة الكبيرة GEV75 الذى كان ينقص النظريين.

وأخيرًا فى سيرن، مصادم غاية فى الكبر للإلكترون بوزيترون، الـLEP وضع فى نفق له محيط يعادل محيط مدينة باريس. ويستخدم لدراسة جسيم آخر هو بوزون الهيجز Higgs boson، المسئول عن كتلة الجسيمات.

البروتونات المضادة، مصدرٌ للطاقة

وتتحول كل الكتلة إلى طاقة عند فناء زوج من البروتون –البروتون المضاد. إنها إذا وسيلة احتراق غاية فى الفعالية: ٢٠٠٠ مرة أكبر من الانصهار المستخدم فى المفاعلات الذرية، و٢٠٠ مرة أكبر من التفاعلات الاندماجية التى تنبع منها طاقة الشمس. ولكن لابد أن نصنع هذه الوسيلة، مما يتطلب طاقة مليار مرة أكبر من الطاقة التى نحصل عليها. وهكذا فإن البروتونات المضادة التى تتراكم فى CERN بعد عام تصلح لإنارة مصباح كهربى لمدة ثوان. إذن لابد أن

تكون التطبيقات تتناسب مع الحالات الخاصة التى تلعب كتلة الاحتراق فيها دورًا أساسيًا. وسيكون التطبيق الأكثر إثارة هو استخدامها كوقود لمركبات الفضاء، كالتى نراها فى حلقات الخيال العلمى ستارتراك للمركبة أنتربرايز. وسيسمح استخدام المادة المضادة بالوصول سريعا للكواكب البعيدة، كالمريخ، تحقيق مهمات صعبة المنال بسبب العائق الكبير الذى تشكله كتلة مادة الاحتراق. عندئذ يمكننا الاكتفاء بواحد على مليون من الجرامات من المادة المضادة التى يتطلب إنتاجها مائة ألف عام من العمل المتواصل لكل من CERN وFermilab... يلزمنا إذا نوع آخر من الحفظ غير الحفظ بداخل حلقات، ومن الممكن أن نحقق هذا عن طريق قصر البروتونات المضادة ومحاصرتها بداخل "زجاجة" كهرومغناطيسية. ويتم حفظ البروتونات – المضادة لمدة أسابيع فى مساحة لا تتعدى بضعة سنتيمترات. ولكن هذا الحصار يتطلب فراغًا كاملاً ومغناطيسات فائقة التوصيل ثم تبريدها إلى بضع درجات من مقياس كلفن (درجات لمقياس الحرارة) ولكن تركيبها يصل إلى عدة أمتار ولا يمكنها أن تحتوى على كمية كبيرة من المادة – المضادة. وهنا أيضا سوف يسمح لنا بروتون مضاد واحد من كل ألف بأسره... وآخرون يقترحون استخدامها فى الأسلحة ولكن الحفظ يتطلب مساحة كبيرة لعدد قليل لا يتعدى المليجرامات. هذه التطبيقات المستقبلية ليست إذن للغد القريب!

وموضوع الدراسة للفيزيائيين

المادة المضادة ليست فقط وسيلة، ولكنها مادة خصبة لدراسة مشوقة للفيزيائيين. والسؤال الأساسى يكمن فى معرفة الخصائص المتطابقة والمختلفة، وفى معرفة هل كل الخصائص الأساسية متطابقة تماما حتى أقرب رقم، أم يوجد بعض الاختلافات؟

ويشير أحد التنبؤات القوية إلى أن الكتل لابد أن تتطابق تماما. هذا التطابق تم التأكد منه بدرجة دقة تصل إلى واحد على عشرة مليارات للبروتون والبروتون المضاد بفضل الفخاخ الكهرومغناطيسية التى ابتكرت حديثا. هذه المقارنة تمت

حديثا فى CERN على يد فريق أمريكى، عن طريق قياس تـــردد دوران كليهمـــا بداخل الفخ الكهرومغناطيسى، هذا التردد يتناسب عكسيا مع الكتلة. بالضبط كما لو وزنا شاحنة تزن عشرة أطنان بدقة تصل إلى واحـــد ميلليجـــرام. كمـــا أشـــارت القياسات غير المباشرة لجسيم الكاوون Kaon المحايد إلى تساو فى الكتـــل حتـــى الرقم العشرى 10^{-19} أو بدقة تصل إلى مليار مرة أعلى. وبدا أن العمل فى مصنع جديد للبروتونات المضادة فى CERN، هدفه الأساســـى تـــصنيع ذرات مـــضادة للهيدروجين مـــن البروتونـــات المـــضادة والبوزيترونـــات المخزنـــة فـــى الفـــخ الكهرومغناطيسى. وستسمح لنا طاقة هذه الذرات الـــصغيرة بدراســـتها ومحاولـــة البحث عن فروق طفيفة فى الكتلة إن وجدت. وتوجد تجارب من نوع آخر نحاول فيها إحلال بروتون مضاد مكان □لكترون (يكون لهما الشحنة الكهربيـــة نفـــسها) حتى نتمكن من دراسة تهاوى هذه النظم غير المستقرة.

ومع ذلك تم رصد عدم تماثل بين المادة والمادة – المضادة فى حالة واحدة. إنها حالة الكاوون المحايد الذى يعتبر من الجسيمات الغريبة (Strange). ويتكـــون هذا الجسيم من كوارك وكوارك مضاد، أحدهما كوارك "تحت" والآخـــر كـــوارك "غريب" غير المستقر. ومنذ ١٩٦٤، نعلم بوجود عـــدم تماثـــل، مـــسمى "خـــرق للازدواج والشحنة" Charge and parity (CP) بين جسيم الكـــاوون المحايـــد K° وجسيمه المضاد $\overline{K^{o}}$ ومكنتنا تجربة الـــسى بـــى ليـــر(CP-LEAR)، بـــسيرن CERN من رصد هذه الحالة مباشرة. فى الواقع، للكاوون صـــفة مذهلـــة تجعلـــه يتردد بين حالة المادة والمادة المضادة. وقامت تجربة CP-LEAR بمقارنة احتمال حدوث العمليتين:

$$K^{\circ} \rightarrow \overline{K^{\circ}} \quad , \overline{K^{\circ}} \rightarrow K^{\circ}$$

وينبغى إذن أن نميز بين حالتى المادة والمادة المضادة للكاوون فى لحظتين مختلفتين: فى لحظة تولدهما ولحظة فنائهما، الذى يفصلهما زمن قدره واحد علـــى مليار من الثانية. ويتم إنتاجهما عن طريق إفناء بروتون مـــضاد عنـــد اصـــطدامه

ببروتون هدف الهيدروجين. ويتم التحكم فى شعاع البروتونات المضادة فى جهاز القصر الحلقى Decelerateur (يسبب قصورًا فى سرعة البروتونات المضادة) بحيث ينتهى مسارها فى مركز الهدف. ويتبع إنتاج الكاوون قوانين التفاعلات "القوية" (π جسيم يسمى بايون)

$$\overline{P} + P \rightarrow K^{o} + K^{-} + \pi^{+}$$

$$\overline{P} + P \rightarrow \overline{K^{o}} + K^{+} + \pi^{-}$$

يتبع فناء الكاوون قوانين التفاعلات "الضعيفة"

$$K^{o} \rightarrow e^{+} + \pi^{+} + \nu_{e}$$

$$\overline{K^{o}} \rightarrow e^{-} + \pi^{+} + \overline{\nu_{e}}$$

وهكذا نستطيع التفرقة بين $K^{o}, \overline{K^{o}}$ عن طريق الشحنات الكهربية للجسيمات المصاحبة لعملية تولدهما وفنائهما. وتم بناء الكاشف على يد فريق عمل تجربة السى بى لير، وسمى بحلقة البروتون المضاد ذات الطاقة الصغيرة (Low Energy antiproton-ring) ويمتاز بأنه يستطيع التفرقة بين الجسيمات المختلفة والتمييز بين شحناتها. كانت قيمة عدم التماثل التى تم قياسها ٠,٧% لصالح المادة.

هل هناك كونٌ من المادة المضادة؟

لا يمكن أن تتواجد المادة والمادة المضادة معا بدون أن يفنى أحدهما الآخر وينتج عن هذه العملية إشعاع. العالم الذى يحيط بنا: أجسادنا، الأرض، الكواكب الأخرى، الشمس، مجرتنا، والمجرات الأخرى البعيدة، التى نستطيع رصدها كلها مكونة من المادة فقط، وإلا كنا قد رصدنا الإشعاعات الناتجة عن مناطق الفناء. إذن لابد لنظرية الانفجار العظيم أن تحتوى على إجابة لهذا الحدث. ويرجع انتصار المادة على حساب المادة المضادة إلى عدم التماثل الذى شرحناه من قبل.

وكما أعلن العالم الروســي أندريــه ســخاروف Andrei Sakharov منــذ ١٩٦٧، لابد أيضا أن يكون البروتون غير مستقر، وهذا ما تتنبأ به نظرية التوحيد الكبرى، ولكننا لم نستطع الآن إلى التأكد من هذا أو نفيه معمليا. ويتنبــأ ســيناريو الانفجار العظيم بأنه بعد بضعة ملليثوان، ستفنى البروتونــات والنيوترونــات مــع جسيماتها المضادة، ويبقى بروتون أو نيوترون واحد من كل مليار عمليــة فنــاء. وهذا فى توافق تام مع الفوتونات والمادة التى تم رصدها فى الكون.

ولا نستطيع أن نستبعد وجود كون مواز لكوننا معمليا، ولكن الفصل المكانى بين المادة والمادة المضادة شيء يصعب شرحه فى إطار نظرية الانفجار العظيم.

ورغم كل شيء إذا أرادت بعض المخلوقات الفضائية أن تلتقى بنا، فسيكون من الأفضل توخى الحذر ومعرفة نوعية الكون الذى يعيشون فيه. وهذا يمكــن أن يفضل عدم التماثل الذى تم رصده للكاوون، لأن عدد الكاوونات K^{o} يفــوق عــدد جسيماتها المضادة، ثم تتحلل هذه الكاوونات وتولد بوزيترونات.

هذه البوزيترونات لا تشكل أيًا من مكونات الذرات التى نتكون منها.

الباب السابع

حالات المادة

التناول الفيزيائى للتعقيد

حالات التماثل والتماثل المحطم:
التنافس بين النظام والفوضى
وتغيرات حالة المادة [1]

بقلم: إدوارد بريزين
Édouard BRÉZIN

ترجمة: لبنى الريدى

مقدمة

لا ريب أن إحساس التناسق المنبعث من التماثل الخاص بالأجسام والأشياء، طبيعية كانت أم اصطناعية، صاحب الإنسان منذ أصوله. ربما يكون التطابق التقريبى للنصفين الأيسر والأيمن للعديد من الكائنات الحية هو الذى أدى إلى تبنى المعايير الجمالية، الحاضرة بشكل واضح فى رؤية المعماريين المصريين واليونانيين الأوائل. إن الخمسة أجسام الأفلاطونية المنتظمة متعددة الأسطح، وهى الأقرب لنا، بدت لكيبلر (Kepler)، نظرًا لكمالها وتفردها، إنها أيضًا النموذج الذى لا غنى عنه الذى يتحكم فى المسافات بين الشمس وكواكب النظام الشمسى الخمسة التى كانت معروفة فى زمانه (إن اكتشاف كوكب سادس، أورانوس (Uranus)، عام ١٧٨١، لم يترك أى مجال لهذا الحلم).

لكن التماثل لم يفرض نفسه تدريجيًا كأداة لفهم الكون، متجاوزًا بذلك هذه الاعتبارات الهندسية والجمالية، إلا ابتداء من نهاية القرن التاسع عشر. وأخيرًا، مع التصور المعاصر للتماثل الموضعى، فرض التماثل نفسه على أنه المفهوم الأول والموحد الذى يسمح بفهم تنظيم المادة، والتفاعلات بين المكونات الأساسية

---

(١) نص المحاضرة رقم ٢٢٠ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٧ أغسطس ٢٠٠٠.

(الكهرومغناطيسية والقوى النووية)، وحتى فهم علم الكون الخاص بكوننا المتضخم الناتج عن الانفجار الأولى العظيم. وفى النهاية، تحقق بشكل ما حلـم كيبلـر: إن التماثل هو الذى يحدد العالم.

إن اللغة تنصب لنا فخاخًا يصعب تفاديها. فإلى جانب التماثل- وعدم التماثل نجد النظام والفوضى المرتبطين بهما ارتباطًا وثيقًا. لكن لنتوخى الحذر، إن التماثل هـو المـرتبط بالفوضـى، فـى حـين ينـتج النظـام عـن التماثـل المحطـم (symétrie brisée)، الذى يختلف عن غياب التماثل، وهو مفهوم سـيتعين علينـا توضيحه فورًا.

القرن التاسع عشر

لقد ترك رائدا دراسة التماثل، لويس باستير (Louis Pasteur) وبيير كورى (Pierre Curie)، آثرهما على القرن التاسع عشر. إنهما خلفا لنا مفـاهيم عميقـة، وتساؤلات لم تكف منذ ذلك الحين عن مرافقتنا.

كانت تجارب الشاب باستير تهدف إلى تحديد الخاصية التى تتمتع بها بعض البلورات، مثل الكوارتز، بأن تجعل مستوى استقطاب الضوء ينحرف. كان باستير كيمائيًا فذًا قبل أن يصبـح العالم البيولوجى العبقـرى الذى يعرفه الجميع، وفـى عام ١٨٤٨، كان يجرى أبحاثًا لتحديد العلاقـة بين هذا النشـاط الضوئى وتركيب البلـورات، ولاحـظ أن بلـورات بـاراطرطرات الـصوديوم (paratartrate de sodium) تتكون من خليط مـن البلّـورات الـصغيرة "الثنائيـة الصورة"، وهى بلورات تتطابق أحيانًا، وتظهر فى أحيان أخرى تطابقًا مع صورة البلّورات السابقة فى المرآة (بقدر ما تكون اليد اليمنى غيـر متطابقـة مـع اليـد اليسرى، لكنها ببساطة متطابقة مع صورتها فى المرآة). وبين عندئذ أن كل نـوع من نوعى البلّورات له خواص ضوئية متناقضة، وهو ما يمثل دليلاً على ظـاهرة صورة اليد فى المرآة على المستوى الجزيئى. لكن اكتشاف باستير ذهب إلى أبعـد

من ذلك، حيث أظهر اختلافًا أساسيًا بين المادة الخاملة والمادة الحية. فى الواقــع، كان توليف البارطرطرات فى المعمل ينتج ميزوطرطرات (mésotartrates) غير نشطة ضوئيا، واتضح أنها تتكون دائمًا من خليط بكميات متساوية من نوعين مــن البلّورات الصغيرة ثنائية الصورة، لكن الحياة غير متماثلة إلى حد بعيــد، بمــا أن بلورات البارطرطرات، الناتجة عن رواسب النبيذ، تكون حصريًا مياسرة.[٢] ومنذ ذلك الحين لم تتوقف الكيمياء الحيوية عن أن تكشف لنا أن الجزيئات المكونة للكائن الحى (الحامض النووى "A D N" والبروتينات إلخ) غير متماثلــة، مــع تجــانس حركى عام:أى أن كل اللوالب المكونة للحامض النووى تدور دائمًا فى الاتجاه ذاته لدى كل الكائنات الحية.

كيف يمكن تفسير مثل هذا الاختلاف بين الكيمياء الحيوية وكيميــاء عــالم الجوامد؟ إنه لغز حقًا، لأن العمليات الفيزيائية التى تــتحكم فــى تكــوين الــذرات والجزيئات لا تميز اليمين واليسار: إن احتمالات حدوث تفاعلاً كيمائيًا ما، وحدوث التفاعل الذى قد يتكون نتيجة صورة ذلك التفاعل فى المرآة متساوية. ومع ذلــك، فلنسجل أن اثنين من علماء الفيزياء الأمريكيين المولودين فى الصين، ت. د. لــى (T.-D.Lee) وس. ن. يانج (C.-N.Yang)، صاغا، عام ١٩٥٦، الفرضية التــى تقول إن التفاعلات النووية المسئولة عن النشاط الإشعاعى بيتا، ليست متطابقة مــع "صورتها فى المرآة"، مما حطم المفهوم الذى كان يجعل من هذا التساوى عقيــدة. وسرعان ما أثبتت عالمة الفيزياء السيدة س. س. وو (C.-S.Wu)، مــن جامعــة كولومبيا، بالتجربة عدم الحفاظ على التساوى المفترض. لو اكتفينا بصورة واحدة، فذلك يعنى أن لدينا إمكانية تعريف الكائنات الفضائية (العارفون بقوانين الطبيعــة!) بما نسميه يمينًا ويسارًا. هل يكفى عدم التماثل الطفيف هذا لتفسير هــذا التجــانس الحركى المدهش بالنسبة لكل ما هو حى؟ يفــضل آخــرون تــصور أن التقلبــات الإحصائية فى جموع البلّورات الصغيرة ثنائيــة الــصورة اليمينيــة واليــسارية،

(٢) Lévogyre: صفة مادة تدير نحو اليسار خط استقطاب الضوء.

المتساوية أصلاً، يمكن أن تحدث عدم تساوى عرضى يتضخم ذاتيًا ويـؤدى إلـى التجانس الحركى لكل ما هو حى. (بالنسبة لى أعتقد أن هـذه الآليـة لا يمكـن أن تكون كافية، دون الاستناد أيضًا إلى الآلية السابقة.) وأخيرًا، يرى آخـرون، علـى إثر ج.موند (J. Monod) فى هذا التجانس الحركى دليلاً على أصل أوحد مـشترك لكل الكائنات الحية. إن البت فى هذه المسألة ليس هو بيت القصيد هنا، إنما إدراك إلى أى مدى تبقى ملحوظة باستير الاستثنائية فى قلب الاهتمامات المعاصرة بأصل الحياة.

إن دراسة الكهربية الإجهادية (piézo-éléctricité) للكوارتز، هذه الخاصية المستخدمة حاليًا بكثرة، فى ساعاتنا التى تعمل بالكوارتز مثلاً، والتى بينها الشقيقان كورى عام ١٨٨٨، هى التى قادت بيير كورى (Curie) إلى صياغة مبدأ تماثـل عميق وعام. فى الواقع، لقد أمعن التفكير فى العلاقة بين اتجاه الاستقطاب الكهربى للبلّورة واتجاه الإجهاد الميكانيكى الذى يولده، وافترض بيير كـورى كمـسلمة أن "عندما تنتج تأثيرات معينة عن أسباب محددة، فإن عناصر تماثل الأسباب يجب أن تتواجد فى التأثيرات المحتملة". إن هذا المبدأ رغم مظهـره الـصورى جـدًا لـه استخدام تطبيقى وعملى تمامًا، خاصة فى وجود مجالات كهربيـة ومغناطيـسية. وبالتالى يفترض هذا المبدأ ضمنيًا، أنه من غير الممكن تحقيق توليفـات كيميائيـة "غير متماثلة"، أى محبذة أحد المركبات، يمينية أو يسارية، لجزيئات تملـك اتجـاه تطابق محدد، لمجرد التأثير عليها بمجال مغناطيسى.

إننا نعرف الآن أن مبدأ كورى هذا، لو أُخذ حرفيًا، لا يغطى المجال المهـم الخاص بحالات التماثل المحطم. ولا يخلو من مفارقة، إدراك أن بيير كورى هـو من اكتشف أيضًا أحد أوائل أمثلة هذا التماثل المحطم، وهو المثال الخاص بالطور الانتقالى من البارامغناطيسية إلـى المغناطيـسية الحديديـة (paramagnétique-ferromagnétique)

الفيزياء الإحصائية:

الطاقة ودرجة التعادل الحرارى (الانتروبيا)

يتعين علينا إذن الرجوع إلى المفهوم المهم للتحطم التلقائى للتماثل وتحديد أولاً موضع التنافس بين النظام (ordre) والفوضى (désordre) الذى يتحكم فى تنظيم المادة. لقد أدرجت الفيزياء الإحصائية فى الديناميكا الحرارية، لكنها لم تأخذ مدلولها كاملاً إلا فى نهاية القرن التاسع عشر، عندما وضع بولتزمان (Boltzman) وجيبز (Gibbs)أسسها. إن الفيزياء الإحصائية هى علم استنتاج خواص العالم الذى يرى بالعين المجردة انطلاقًا من المكونات الأولية للمادة.

لنفحص عملية بسيطة ومعتادة مثل تجمد سائل. تملك المادة الجامدة التى تكونت بنية منتظمة، حيث تصطف الذرات أو الجزيئات المكونة للمادة عند قمة شبكة فراغية دورية. (ولنلاحظ عرضًا فى هذا المجال الارتباط المدهش بين الرياضيات والفيزياء: لقد تم التعبير رياضيًا عن حالات التماثل بمساعدة نظرية الزمرات (théorie des groupes)، أى نظرية العمليات التى تترك شيئًا دون تغيير. تقود هذه النظرية إلى إثبات أنه لا يوجد سوى ٢٣٠ تكوينًا دوريًا ممكنًا لهذه الترتيبات الفراغية للجزيئات. وتمكن الباحثون فى علم البلّورات من تحديد تكوينات صلبة تحقق كل واحدة من هذه الاحتمالات الـ٢٣٠. ويتعين أيضًا ملاحظة أن الطبيعة تعرف كيف تبطل النظريات الرياضية، بما أن أيًا من التكوينات المسموح بها لا تملك تماثلاً من الرتبة الخامسة: غير أن فى عام ١٩٨٤ تم اكتشاف "مادة جامدة" تملك مثل هذا التماثل المحظور، مما أثار دهشة عامة. إن هذه التكوينات المحددة حاليًا بدقة والمسماة أشباه-بلورات هى فى الواقع لا دورية تمامًا.) إذا حاولنا تصور سلوك الجزيئات المكونة للمادة عند حدوث عملية التجمد، فإن ضخامة عدد الجزيئات المحتواة فى أصغر حبة من المادة تجعل العملية مذهلة تمامًا. إن قطرة ماء صغيرة تتكون من العديد من المليارات والمليارات من الجزيئات. إذن، يحدث أى خفض طفيف لدرجة حرارة الماء تحت درجة الصفر

المئوى ترتيبًا فراغيًا لعدد هائل من الجزيئات، دون أن يكون هناك شيء جاء وعدل من هذه الجزيئات ولا من قوى التفاعل المتبادلة التى تحكم سلوكها. لنعرض فيلمًا بشكل ارتجاعى لنهاية عرض عسكرى لحظة تفرق الجنود، ولنتصور عرضًا عسكريًا خياليًا يشارك فيه مليارات ومليارات المشاركين وسنحصل على صورة مجهرية لعملية التجمد.

إن التحول من الحالة الجامدة إلى الحالة السائلة هو إظهار لظاهرتين متضادتين تستعملان الطاقة ودرجة التعادل الحرارى. فى الواقع، فى هذه المادة التى يمكن رؤيتها بالعين المجردة، تكون تشكيلات الجزيئات لا حصر لها، وكل واحدة منها قابلة للتحقق باحتمال صغير، ويتزايد الاحتمال كلما كانت طاقتها منخفضة ودرجة حرارتها مرتفعة. عند درجة الحرارة المنخفضة، أى فى الطور الصلب، تكون التشكيلات ذات الطاقة المنخفضة هى ذات الثقل السائد، وهى تشكيلات منظمة جدًا فراغيًا لتسمح للجزيئات بأن "تستفيد" من تجاذبها المتبادل. فى الجانب المقابل، عند درجة حرارة أعلى يؤدى تعدد التشكيلات الممكنة إلى نبذ التشكيلات المنظمة، وتحبيذ التشكيلات الأكثر طاقة، والتى يكون حدوثها بالتالى أقل احتمالاً، لكنها كثيرة جدًا بحيث تتغلب على هذا الاعتبار (الذى طابقه بولتزمان (Boltzmann) مع درجة التعادل الحرارى الخاصة بعلماء الميكانيكا الحرارية). لنقارن الجماد والسائل: إن السائل موحد الخواص فى جميع الاتجاهات، ليس لديه اتجاه مفضل. كما أنه متجانس تمامًا، متطابق فى جميع نقاطه. أما الجماد فلديه محاور بلّورية مفضلة ونقاط تقوم بدور القمم للشبكة الدورية التى جاءت الجزيئات لتصطف عليها. ومن ثم فإن الجماد بالطبع أكثر تنظيمًا من السائل، لكنه أقل تماثلاً منه، بما أن العمليات مثل الدوران أو الإزاحة التعسفية التى لا تحدث تغييرًا للسائل، لا تترك الجامد ثابتًا. إن تحطم التماثل، الذى يبديه النظام البلورى، يحدث تلقائيًا بمعنى أنه لا يستلزم أى عامل خارجى، أو أى تفاعل يحبذ اتجاهات معينة.

لتوضيح المقصود بالتحطم التلقائى للتماثل للعيان بطريقة أكثر حدسية، يمكن تأمل التواء عارضة أو جسر تحت تأثير حمل مفرط. حتى إن كان الضغط

الممارس يتطابق تمامًا مع محور العارضة أو الجسر فإن الأمر سينتهى بأن تلتوى بطريقة غير متماثلة إذا تجاوز الضغط حدًا معينًا. وبالتالى يتضح أن ذلك يستلزم استكمالاً طفيفًا لمبدأ كورى: إن تماثل حالة معينة ناتجة عن سبب محدد يمكن أن يكون لديه تماثل أقل من هذا الأخير. فقط مجموع الحالات الممكنة تحت تأثير هذا السبب لها تماثل التأثيرات التى أحدثتها.

إذن، ينتج عدد كبير من تغيرات حالة المادة من تلك الظاهرة، أى ظاهرة التماثل المحطم. إن "المغناطيسات" الدائمة تمثل تمغنط فى اتجاه فراغى محدد تمامًا، غير أن هذا التمغنط يزول عندما ترتفع درجة الحرارة أعلى من حد معين (وتحمل درجة الحرارة هذه اسم كورى الذى اكتشف هذا التحول من حالة "مغناطيسية حديدية" ممغنطة وتظهر اتجاهًا إلى حالة "بارامغناطيسية" لا اتجاهًا لها وبالتالى موحدة الخواص فى جميع الاتجاهات). فى أيامنا تمثل التوصيلية الفائقة، والسيولة الفائقة، وأطوار البلّورات السائلة، والعديد من تغيرات حالة المادة الأخرى، إضافات تثرى دون توقف قائمة حالات التماثل المحطم تلقائيًا التى يمثلها تنظيم المادة. إن عيوب ونقائص النظام ذاتها (المادة الصلبة، وكذلك كل تركيب منظم، يملك عيوبًا) تنتظم بطريقة تميز تمامًا حالات التماثل المحطم الموجودة فى التركيب.

إن فهم آلية التنافس بين النظام والفوضى (أو الطاقة- ودرجة التعادل الحرارى) المستعملة فى هذه التحولات امتد عدة عقود. ففى عام ١٩٤٠، وبعد سنوات من التساؤلات غير المقنعة، بينت أعمال الفيزيائى ر.بيرلس (R. Peierls)، الذى هرب من النازية إلى إنجلترا، أن الصياغة الإحصائية للفيزياء، التى تدين بالكثير لبولتزمان (Boltzmann)، تتضمن تمامًا إمكانية، بل ضرورة، أن يتم التحول الطورى بالتحطم التلقائى للتماثل. وفى الفترة نفسها، وضعت الدراسة المنهجية لأنواع التماثل وتحطمها التلقائى، التى قام بها ل. لادو (L. Ladeau) فى الاتحاد السوفيتى، نهاية للمشكلة بطريقة ما. لقد أدخل لادو (Ladeau) مفهوم معلم (بارامتر) النظام، وهو مفهوم مهم جدًا يسمح بوضع مميزات التحول الطورى والظواهر الفريدة التى تصاحبه. فى الطور المتماثل، أى غير المنظم، يكون هذا

المعلم صفرًا. وفى المقابل، يأخذ هذا المعلم قيمة غير صفرية تلقائيًا، أى بدون أية إثارة خارجية، فى الطور المنظم، أى ذى التماثل المحطم.

لكن كان يتعين أن تبرز المشكلة مجددًا فى الستينيات من القرن العشرين مع وصول وسائل تجريبية جديدة، مثل الليزر أو حيود النيوترونات، التى كشفت أن النظرية التى طورها لادو (Ladeau)، غالبًا ما تكون متطابقة مع التجربة كيفيًا، غير أنها فى الحقيقة غير صحيحة كميًا. ولتسمحوا لى ألا أحاول أن أعرض هنا الأعمال الخاصة بمجموعة إعادة الضبط، والتى سمحت بحل هذه المشكلة (والعديد غيرها فى أثرها) ونال بسببها الأمريكى ك. ويلسون (K. Wilson) جائزة نوبل للفيزياء لعام ١٩٨١.

حالات تماثل عالم ما دون النووى

لقد لعبت مفاهيم التماثل، المرتبطة بعمليات تترك النظام ثابتًا كميًا، دورًا مركزيًا فى الأفكار الفيزيائية. سوف أكتفى بذكر التناقض بين حالات تماثل جاليليو الخاصة بالميكانيكا التقليدية، وحالات تماثل لورنز - بوانكاريه (Lorenz – Poincarré) الخاصة بكهروديناميكا ماكسويل (Maxwell)، دون أن أشرحه هنا. إن هذا التناقض هو الذى قاد أينشتاين (Einstein) إلى النسبية الخاصة. إن أينشتاين، الذى يقوده دائمًا اهتمامه بوصف قوانين الفيزياء بطريقة كلية، مستقلة عن وضع حركة المراقبين، قد توصل بعد ذلك بقليل عن طريق اعتبارات ثابتية، أى اعتبارات تماثل، إلى النسبية العامة، النظرية الجديدة للجاذبية، والقاعدة التى لا غنى عنها لعلم الكون المعاصر. والأقرب إلينا، الكوارك،[٣] وهو عنصر مكون للمادة المرتبطة بقوى نووية قوية، لقد تم إثبات وجوده عن طريق خواص التماثل الممثلة فى تصنيف الجسيمات الأساسية، وهى طريقة تذكر بتفسير وتوضيح تركيب الذرات انطلاقًا من حالات انتظام جدول مندلييف (Mendeleïev).

---

(٣) جسيم يفترض وجوده لفهم بنية الميزون والباريون. (المترجم)

لكنى أريد هنا أن أحاول وصف الأفكار المهمة جدًا الخاصة بالتماثل الموضعى (sy métrie locale) (المسماة بشكل أكثر شيوعًا حالات تماثل المعايرة (symétries de jauge) حتى وإن كانت هذه التسمية لا توضح كثيرًا هذا المفهوم)، وهى أفكار أتاحت، فى الفترة المعاصرة، فهم التفاعلات بين الجسيمات الأساسية (الكهرومغناطيسية وكذلك النووية الضعيفة والقوية). إن التماثل هذه المرة لم يعد مجرد خاصية للتركيب أو البنية، لكنه أصبح العنصر الذى يسمح بتحديد ديناميكا القوى الكهرومغناطيسية والنووية بالكامل.

وفى عام ١٩٢٥، وضعت أعمال الفيزيائى الإنجليزى ب. أ. م. ديراك (P. A. M. Dirac) نظرية الإلكترون المتفاعل مع الإشعاع الكهرومغناطيسى والتى دمجت معًا ميكانيكا الكم الجديدة والنسبية ومعادلات ماكسويل الخاصة بالكهرومغناطيسية. وأدرك الفيزيائي- الرياضى هـ.ويل (H. Weyl) أن التفاعل بين الجسيمات المزودة بشحنة كهربية والإشعاع الكهرومغناطيسى، كما ظهر فى نظرية ديراك (Dirac)، نتج بطريقة فريدة عن خاصية تماثل غير مشكوك فيه. ويقلب الاستدلال، يكون إذن تماثل"المعايرة" هذا كافيا لترسيخ نظرية ماكسويل - ديراك (M axwell – Dirac). قد يتطلب أى شرح دقيق صورية[٤] مفرطة بعض الشيء. فى كلمات قليلة، يجب معرفة أن حالات جسيم ما مثل الإلكترون يوصف فى الميكانيكا الكمية بدالة موجة هى عبارة عن عدد مركب فى كل نقطة من الزمكان (يمكن تصور ذلك بمتجه فى مستوى مرتبط بكل نقطة من الزمكان). ولا تتغير النظرية إذا تم تعديل الطور بالكمية نفسها لكل نقاط الزمكان (بمعنى، لو تم تدوير كل هذه المتجهات فى المستوى بالزاوية نفسها). إن هذا التماثل الأولى ليس عاديًا تمامًا، بما أنه يتطلب أن تكون الشحنة الكهربية "محفوظة"، أى أن تكون الشحنة النهائية فى أى عملية هى نفسها الشحنة الأصلية.

هل يمكن تعديل هذا الطور بشكل مستقل لكل نقطة من الزمكان؟ بداهة الإجابة سلبية، بمعنى أنه فى غياب المجال الكهرومغناطيسى لا تكون هذه العملية

---

(٤) مذهب فلسفى قوامه الاعتقاد بأن حقائق العلوم صور مجردة مستندة إلى تعريفات مسلم بها. (المترجم)

بالطبع إحدى حالات التماثل التى تقول بها النظرية. لكن ويـل (Weyl) أدرك أن وظيفة المجال الكهرومغناطيسى كانت بالتحديد هى إنشاء خاصية الثباتية الموضعية تلك. إن المجال الناتج عن هذه الثباتية المسلم بها يخضع لمعادلات ماكسويل، ويقوم بوضوح بإدخال تفاعلات ذات مدى لانهائى بما أنه يسمح بتغيير الأطـوار بـشكل مستقل فى نقاط متباعدة اصطلاحيًا. ويتكون هذا المجال، طبقًا للمصطلحات نظرية الكم، من فوتونات، وهو ما كان قد أدركه أينشتاين، وهى جسيمات لا كتلة لها بمـا أنها حاملة لتماثل يمتد لمسافات اصطلاحية لا نهائية (يتناسب المدى مع عكس هذه الكتلة).

وفى عام ١٩٥٦، قدمت أعمال يانج (Yang) وميلز (Mills) تعميمًا لهـذه الأفكار على حالات تماثل أكثر تعقيدًا من مجـرد دوران بـسيط لمتجهـات فـى مستوى. وظهرت فى أعمالهما مجالات "معايرة" أخرى غير الفوتونات، لكنها لـم تلق فى البداية أى اهتمام، وذلك للأسباب نفسها، لأن الجسيمات المـشاركة كانـت هى أيضًا لا كتلة لها ومن ثم التفاعلات التى تتوسط فيها هذه المجالات ذات المدى اللانهائى. كان المنظرون الذين يستهدفون فهم القوى النووية، خاصة القوى المسماة "ضعيفة"، المسئولة مثلاً عن تفكك بيتا من الأنويـة المـزودة بعـدد زائـد مـن النترونات، سيتبنون بكل سرور نظرية يانج – ميلـز (Yang – Mills) غيـر أن مدى القوى النووية الضعيفة لا يتجاوز أبدًا أجزاء من مليار المليار مـن المتـر، وكان سيبدو مستحيلاً، بل وعبثيًا، استنباط تلك القوى من نظرية مـدى التفـاعلات فيها كبير اصطلاحيًا. إن فهم آلية التماثل المحطم هو الذى سمح فى النهاية بوضع هذه النظرية الخاصة بالتفاعلات الضعيفة، التى توحدت فضلاً عن ذلك مع النظرية الكهرومغناطيسية (نموذج وينبرج – سلام (Weinberg – Salam) وأعمال عديـدة منها أعمال تهوفـت (t' Hooft) وفلتمـان (Veltman)، جـائزة نوبـل ١٩٩٩). وبالإضافة إلى الجسيمات المعتادة، تم إدخال مجال مادة إضافية، "بـوزون هيجـز (Higgs)" (الذى لا يزال افتراضيًا ويجرى البحث عنه تجريبيًا بهمة ونشاط). فـى طور التماثل الأول، الذى ربما لم يوجد إلا لبضع لحظات متناهيـة الـصغر بعـد

الانفجار العظيم، كان سيناريو يانج – ميلز (Yang – Mills) بكل مجالات الكتلة الصفرية الخاصة به يباشر عمله، لكن تحطم تلقائى للتماثل، تحول طورى مشابه للتحول الطورى فى حالة التوصيلية الفائقة المذكورة بالنسبة للمادة التى ترى بالعين المجردة، أظهر طورًا جديدًا، طور عالمنا اليوم، حيث أصبحت بعض مجالات يانج– ميلز (Yang – Mills) ذات كتلة، كما كان يتعين أن تكون لتتطابق مع الملاحظات التجريبية. وفى السبعينيات من القرن العشرين، أدى الاكتشاف التجريبى للجسيمات Z و±W فى C E R N، المطابقة للفوتونات من حيث دورها كحاملة لتماثل موضعى، غير أنها ذات كتلة لكى لا تنقل التفاعل إلا على مدى قصير، إلى إثبات صحة هذه البنية غير العادية.

حالات التحول الطورى وعلم الكون:
نماذج كون فى حالة تمدد

إن السيناريو التقليدى "للانفجار العظيم"، ولكون فى حالة تمدد ثابت الحرارة انطلاقًا من تفرد أولى، قد عرف نجاحات متعددة. ويعتبر النجاح الأجدر بالذكر هو التنبؤ، الذى تأكد حاليًا بكثرة، بالإشعاع "الأحفورى" المتروك لنفسه منذ مليارات السنين دون أن يتفاعل أبدًا، والذى يسبح فيه الكون. لكن قد يتعين على هذه النظرية عرض وتحليل ملاحظات متعددة، مثل فهم النسبة بين عدد الجسيمات ذات الكتلة وعدد الفوتونات المرصودة حاليًا، أو ضرورة تقوس الكون، تقوسًا متناهى الضعف، أثناء اللحظات الأولى من الانفجار العظيم، وأدت هذه الملاحظات أيضًا إلى الاستناد فى بدء كوننا إلى آلية تماثل محطم تلقائيًا. إن هذه النماذج لكون فى حالة تمدد، التى اقترحها الأمريكى أ. جوت (A. Guth) والروسى أ. ليند (A. Linde) (فى ستانفورد منذ ذلك الوقت وصاعدًا)، تحل المشكلات المذكورة عاليه إذا افترضنا أن الكون عرف تحولاً طوريًا مع زيادة مفاجئة فى درجة التعادل الحرارى، ظهر فيها الزمكان الخاص بنا، تقريبًا مثل فقاعة بخار فى سائل عند درجة غليانه. ويجرى حاليًا إمعان النظر فى بدائل عديدة لهذه الفكرة، مثل

التمدد الفوضوى الذى يفترض تكون زبد من الفقاقيع، بـــدون ارتباطـــات ســـببية متبادلة، يتطور كل منها إلى أنواع مختلفة من الأكوان. لتصبح واحدة فقط من بينها هى كوننا. إن صحة هذه السيناريوهات المتعددة تعتمد على قدرتها على أن تكـــرر المعالم (البارامترات) التى تم رصدها حاليًا لكوننا. وبلا شك، لا يزال الوقت مبكرًا جدًا للحكم أو اتخاذ قرار، لكن يبدو أنه يتعين بشكل عام جدًا على علماء علم الكون اللجوء إلى تماثل محطم لوضع نماذج لتطور الكون.

خاتمة

إننى أدرك أن هذه السطور القليلة قد تبدو فى كثيـــر مـــن الأحيـــان غيـــر مفهومة. أتمنى فقط أن يشاركنا القارئ الذى يكون قد صاحبنى حتى الآن انبهارنـــا أمام عالم تحدد تطوره وقواه المتواجدة، بشكل شبه حصرى، حالات تماثله وحالات تحطم هذا التماثل. لم يحدث من قبل أن كان عدد صغير جدًا من المبادئ كافيًا لفهم مثل هذا التنوع فى المواقف. ففى النهاية، على مستوى المكونات الأساسية للمـــادة، لا يزال فهم نظرية كمية للجاذبية هو المستثنى الوحيد من هذه البنية.

قراءات مكملة:

أعمال المؤتمر الرابع فيزياء وتساؤلات أساسية، وعنوانها "تماثـــل وتحطـــم التماثل"، التى قامت E D P Sciences بنشرها عام ١٩٩٩. وتـــشرح مـــساهمات عديدة بعض الموضوعات المذكورة عاليه.

الموائع والدوامات(٥)

بقلم: مارسيل لزيير
Marcel LESIEUR

ترجمة: لبنى الريدى

مقدمة

إن الأعاصير الأخيرة التى تعرضت لها فرنسا فى ديسمبر ١٩٩٩ ذكرتنا بقسوة بأهمية الموائع مثل الهواء والماء. فالهواء يجعل الطائرات تطير، الشراعية منها والمظلات المستطيلة، ويدفع قلوع السفن، ويشغل طواحين الهواء، ويغير اتجاه الرميات الحرة لبلاتينى وزيدان فى المرمى، وينشر النار.

إن الماء أساسى بالطبع، وتظهر ديناميكيته بأشكال متعددة فى السيول الجبلية، والأنهار، والتيارات البحرية، والمضخات والتوربينات ودوائر تبريد المحطات النووية... كما أن لموائع أخرى مثل الدم فى أوردتنا وشراييننا الأهمية نفسها بالنسبة للحياة، فالاضطرابات القلبية-الوعائية تنجم سواء عن سلوك اضطرابى للدم، أو عن لزوجة كبيرة جدًا للدم. كما توجد موائع أيضًا فى الأغلفة الجوية لكواكب مثل الزهرة والكواكب العملاقة (خاصة المشترى، وبقعته المهيبة، الموضحة فى الشكل رقم (١) (انظر خارج النص)، وفى الأغلفة الجوية للنجوم (ومن بينها الشمس)، وفى الأوساط خارج المجرات.

سنبدأ بالتذكير بمبادئ الميكانيكا التقليدية والديناميكا الحرارية التى تسمح بكتابة معادلات ميكانيكا الموائع. وسيساعدنا مبدأ برنولى (Bernoulli) بشكل

---

(٥) نص المحاضرة رقم ٢٢١ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٨ أغسطس ٢٠٠٠.

خاص فى فهم قوة رفع الكرات. وسنرى بعد ذلك كيف تولد الاختلافات الكبيرة فى السرعة (طبقة الخليط) دوامات حلزونية رائعة تتدفق فى شكل اضطراب ذى مقياس صغير، طبقًا لـ"شلال الطاقة" الشهير لريتشاردسون - كولموجوروف (Richardson – Kolmogorov).

فى الوقت الذى يقوم علماء البيولوجيا بكشف أسرار تركيب الجينوم البشرى، تحقق تقدم حاسم فيما يتعلق ببنية الاضطراب والدوامات التى تكونه، وذلك نتيجة الحل الرقمى لمعادلات الحركة بواسطة حاسبات علمية عملاقة. وسنبين كيف أن المعالجة ذات الكفاءة العالية للصور تسمح بأن تجعل الدوامات مرئية وتتيح متابعة تطورها ونموها. لقد تحقق بشكل خاص تقدم كبير بفضل مفهوم "محاكاة المقاييس الكبيرة"، حيث تستبعد التقلبات ذات المقياس الصغير ويتم وضع نماذج لها بواسطة لزوجة مضطربة ذكية. سنبين أمثلة لحالات المحاكاة التى أجريت فى جرينوبل (Grenoble) (بواسطة"لزوجة طيفية")، مع حلقات - دوامة (المسئولة عن دوائر الدخان) فى نفثة، والدوامات شبه الطولية والمقوسة بجوار حاجز. وسنناقش السيطرة على هذه الدوامات للتقليل من القوة الساحبة والضوضاء فى مجالى الديناميكا الهوائية والديناميكا المائية. فى الواقع، يمكن أن نأمل فى خفض الاستهلاك الكلى للطاقة بنسبة ٣٠%، بفضل السيطرة على الاضطراب فى جميع المواقف التى يظهر فيها.

وسننهى المحاضرة بـ"سابقتين" من جرينوبل (Grenoble) فى مجال المحاكاة الرقمية، تحققتا منذ بضع سنوات:

- مصراع الجناح الخلفى لمكوك الفضاء الأوروبى هرمس Hermès.

- تكوين دوامات شديدة فى جبهات الغلاف الجوى، تشبه بدرجة كبيرة العواصف التى ضربت فرنسا فى الفترة من ٢٦ إلى ٢٨ ديسمبر ١٩٩٩.

وسط متصل

إننا نعمل فى إطار فرضية الوسط المتصل، وسندرس فى هذا الوسط أجزاء "صغيرة" مائعة، بالمعنى التالى: لهذه الأجزاء حجم أصغر من المقـاييس المميـزة لحركات المائع لكنها أكبر بكثير من متوسط المسار الحر للجزيئـات. يُقـدر هـذا الأخير بحوالي واحد على ألف من الميكرون، بينما تكون مثلاً أصـغر الأطـوال الموجية المميزة لحركات الموائع (تسمى مقاييس لزجة) في الهواء ميكرونًا علـى جناح طائرة، ومليمترًا فى حالة الاضطراب الجوى. إذن يوجـد بالنـسبة للهـواء "فصل للمقياس" بين حركات الموائع والحركات الجزيئية. فقط فى حالـة جريـان يتجاوز خمسة أضعاف سرعة الصوت، أى عدده الماخى[٦] أعلى من ٢٠، تـصبح المقاييس اللزجة بحدود المقاييس الجزيئية نفسها، ويتعين فى هذه الحالة العمل فـى إطار معادلة بولتزمان (Boltzmann). إن المقاييس المائعة أهـم، بـشكل عـام، بالنسبة لسائل عنها بالنسبة لغاز، بحيث يكون فصل المقياس أكثر وضوحًا.

الحفاظ على الكتلة

سندرس جزءًا صغيرًا من مائع (بالمعنى المحدد عاليه) له شكل ما،[٧] كتلته m، وحجمه V وكتلة وحدة حجمه: $\rho = m / V$، وسيتم تتبعه فى حركته مع المائع. فى الواقع، تتم انتقالات الكتلة بالانتشار الجزيئى عبر غلاف الجـزء المـائع فـى الاتجاهين، وتتعادل فى حالة المدد الزمنية المميزة لتطور الوسط المتصل وهى مدد طويلة مقارنة بالمدد الزمنية الخاصة بالاضطراب الجزيئى. ويزودنا هذا الحفـاظ

(٦) العدد الماخى هو النسبة بين سرعة نموذجية لمائل وسرعة الصوت، وتتناسب هذه السرعة مع الجـذر التربيعى للحرارة.

(٧) يستطيع بالإضافة إلى ذلك أن ينمو مع الزمن.

على كتلة الجزء أثناء الحركة بأول علاقة بين مجهولى القضية، وهى تسمى معادلة الاتصال.

محصلة القوى

سنقوم الآن بحساب محصلة القوى. سنذكر بالمبدأ الأساسى الأول الشهير للميكانيكا التقليدية لنيوتن الخاص بنظام مادى ما:

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$$

حيث $\Sigma\vec{F}$ هى مجموع القوى الخارجية، و$\vec{a}$ عجلة مركز الثقل. وتكون القوى الخارجية، بالنسبة للجزء الصغير من المائع، هى: الجاذبية، وقوى الضغط الخارجية على الغلاف، وتكون عمودية عليه، وقوى لزوجة يمارسها المائع الخارجى على امتداد الغلاف والتى يعبر عنها بفرضية ما يسمى "المائع النيوتنى"[٨]، وقوى خارجية أخرى محتملة. وتسمى المعادلة التى يتم الحصول عليها لمحصلة هذه القوى بمعادلة نافييه – ستوكس (Navier – Stokes). لقد صاغها فى الواقع نافييه (Navier)، عام ١٨٢٢. وكان عالم الرياضيات إيلير (Euler) قد كتبها منذ عام ١٧٥٠ (معادلة إيلير Euler) لكن بدون اللزوجة.

محصلة الطاقة

تدخل فى حساب محصلتى الكتلة والقوى المذكورتين آنفًا ثلاث كميات مجهولة، السرعة والضغط وكتلة وحدة الحجم. هناك إذن ضرورة لمعادلة ثالثة، وسيتم الحصول عليها بوضع محصلة طاقة تعتمد على المبدأ الأول للديناميكا الحرارية. بالنسبة لغاز مثالى، حيث يتم إهمال التبادلات الحرارية الخاصة

---

(٨) من بين مبادئ الميكانيكا الثلاثة التى أعلنها نيوتن عام ١٦٨٧، يقول المبدأ الثالث إن المقاومة التى تحدث فجأة (...) داخل مائع ما (...) تتناسب طرديًا مع السرعة التى تنفصل بها مختلف عناصر المائع عن بعضها البعض.

بالانتشار الجزيئى عبر غلاف الجزء الصغير من المـــائع، وإذا لــم تكــن هنـــاك واردات أو خسائر حرارية خارجية (مثل الإشعاع)، نصل إلى الحفاظ على الكميـــة (p/ρ^{γ} أو pV^{γ}) مع متابعة الحركة (حيث γ هى نسبة قيم الحرارة النوعيـــة عنـــد ضغط وحجم ثابت). لقد تعرفنا على هذه العلاقة فى المدرسة الثانويـــة، لوصـــف انضغاط أو تمدد غاز مثالى بدون تبادل حرارى. إن تبادلات الحـــرارة بالانتـــشار الجزيئى، سواء كان الأمر يتعلق بغاز أو سائل، يعبر عنها بفضل قـــانون فورييـــه Fourier.[٩]

إن معادلات نافييه – ستوكس (Stokes Navier)، مثلها مثل كل المعادلات فى الفيزياء، ليست سوى نماذج يتعين إثبات صحتها بمقارنتها بالواقع. وعمليـــات إثبات الصحة هى التالية: أولاً، لقد تم التحقق تجريبيًا من توقعاتها النظرية بالنـــسبة لحالات الجريان الرقائقى مثل أنبوب مستوى أو قناة (حـــالات جريـــان بواســـوى Poiseuille)،[١٠] أو طبقة حدية، أو طبقة خليط أو نفثة. من ناحية أخرى، فى حالة الجريان المضطرب، تؤدى المحاكاة الرقمية لهذه المعادلات، المنفذة بفضل طرائق دقيقة جدًا[١١] فى حالة أمثلة الجريان نفسها، إلى نتائج تتطابق تطابقًا ممتـــازًا مـــع القياسات التجريبية التى أجريت فى المعمل فيما يتعلـــق بمتوســـطات المتغيـــرات الأساسية.

---

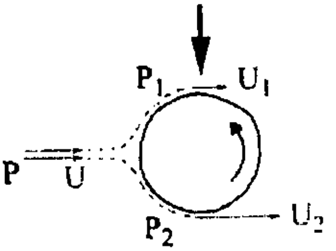
(٩) الذى يفترض أن دفق الحرارة، أى كمية الحرارة لكل وحدة زمن، المار فى اتجـــاه س عبـــر وحـــدة مساحة عمودية على س، يتناسب طرديًا مع تغير درجة الحرارة بين نقطتين فـــى هـــذا الاتجـــاه. إن الطرائق الرياضية التى طورها فورييه (Fourrier) لحل معادلة الحرارة الخاصة به أدت إلى مفهـــوم الصيغة المحسنة لفورييه (Fourrier) المستخدمة فيما بعد لدراسات الاضطراب).

(١٠)كان بواسوى (Poiseuille) طبيبًا، وفى إطار أبحاثه عن سلوك الدم فى الأوردة تمكـــن مـــن وضـــع القوانين التى تتحكم فى هذا الجريان.

(١١)إنها طرائق تعتمد على التحليل الطيفى، حيث يتم تحليل المعالم (بارامترات) الرئيسية للجريـــان إلـــى مجموعات فورييه (Fourier) طبقًا لمتغيرات الحيز.

نظرية برنولى (Bernoulli) و"الرفع"

يمكننا انطلاقًا من معادلة إيلير (Euler) (أى فى مائع تهمل فيه الآثار الخاصة باللزوجة)، وبافتراض أن الجريان يتم مستقلاً عن الزمن وأنه غير قابل للانضغاط، أن نثبت بسهولة أن التغيرات فى الضغط مع متابعة الحركة تساوى التغيرات فى الطاقة الميكانيكية (طاقة حركة بالإضافة إلى طاقة وضع) لكل وحدة حجم ومضادة لها فى الاتجاه. وجدير بالملاحظة أن نتيجة مماثلة (مدمجة على المائع) اكتشفت عام ١٧٣٢ بواسطة دانيل برنولى (Daniel Bernoulli) (أى قبل معادلة إيلير Euler بحوالى عشرين عامًا) بتطبيق ما يسمى بنظرية الطاقة الحركية للميكانيكا التقليدية. ولهذه النتيجة تطبيقات عديدة فى الميكانيكا الهوائية، مثل تفسير قوة رفع جناح أو شراع (راجع لزيير Lesieur). كما تسمح أيضًا بفهم "الرفع" الخاص بكرة ما (راجع الشكل رقم٢، حيث يتخذ المراقب مكانه فى العلامة المربوطة بالكرة.)



الشكل (٢)

رفع كرة، ممثلاً فى علامة مربوطة بها.

لندرس حالة كرة كروية تدور كما هو موضح فى الشكل. يفترض أن تذهب الكرة من اليمين إلى اليسار بسرعة U، لكن لنضع أنفسنا فى علامة مربوطة بالكرة، حيث تكون الكرة ساكنة وترى الهواء قادمًا من اليسار بسرعة U. لنفرض أن جزئين مائعين صغيرين، لهما السرعة U والضغط p نفسهما من أعلى، ينفصلان ليمر على التوالى أحدهما فوق الكرة (الوضع أ،بسرعة U_1 وضغط P_1)

والآخر تحت الكرة (وضع ٢، بسرعة U_2 وضغط p_2). وبتطبيق نظرية برنــولى (Bernoulli) (الصحيحة هنا بشكل تقريبى)، يكون لدينا:

$$p + \frac{1}{2}\rho U^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2$$

ونتيجة لدوران الكرة، فإن الهواء الواقع أعلى الكرة مباشرة سيقلل دورانهــا من سرعته، فى حين سيتسارع الهواء الواقع أسفل الكرة. وبالتالى ســيكون لــدينا $U_1 < U_2$ مما ينجم عنه أن يكون $p_2 > p_1$ هناك إذن قوة رفع مضادة عمودية على المسار (تأثير Magnus). فى كرة القدم، يرجع الفضل فى العديد من الأهداف التى سجلت من ضربة حرة إلى هذا التأثير: إن الكرة التى يضربها الهداف بقدمه نحــو الأعلى ويحركها حركة دوران حول نفسها، والمرسلة فى البداية على مسار عــالٍ، ترتد نحو المرمى. ومن ناحية أخرى، فإنها تكون أثقل مما لــو كانــت لا تــدور، وهذان العنصران يفاجأن حارس المرمى. ونقابل الرفع فى ألعاب كرة أخرى مثــل التنس،[١٢] أو تنس الطاولة أو الرجبى.

دوامات

لنعرض الآن ما يسمى "السحابة الدوامية"، انطلاقًا مــن النمــوذج المبــسط لطبقة الخليط الموضح فى الشكل ٣ (خارج النص). لنفترض تيــارين متــوازيين سرعتهما مختلفة U_1 فى (الأعلى) وU_2 (فى الأسفل، مع $U_1 < U_2$) يتصلان طبقًا لطبقة سمكها Δ. يمكن تعريف الدوامية حدسيًا بالطريقة التالية: نفترض (ذهنيًا) أنه يتم وضع عجلة صغيرة فى الجريان بحيث يكون محور دوران ريــشاتها متعامــدًا على مستوى الشكل. لن تتحرك العجلة فى التيــارين الثــابتين U_1 وU_2. وعلــى النقيض، ستدور العجلة فى اتجاه عقارب الساعة فى الطبقة ذات السمك Δ. سنقول إن الدوامية صفر فى كل مكان ما عدا على هذه الطبقة حيث تكون سالبة. وبطريقة أكثر دقة، سيتم تعريف الدوامية رياضيًا على أنها مسبب دوران مجــال الــسرعة

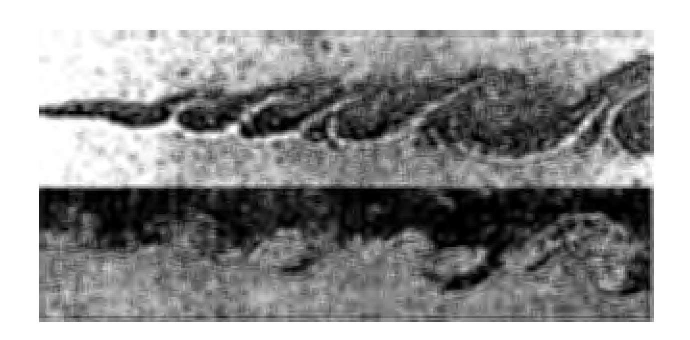
(١٢) على نقيض الرفع يجعل "القطع" الكرة تحلق.

(راجع مرجع ٤ ص ٤٣). إنه مجال متجهات، حيث خيوط المجال تسمى "خيوط الدوامة". عندما يدور المائع، تكون شدة الدوامية مساوية لضعف السرعة الزاوية للدوران. في الواقع هذا النوع من الشكل غير مستقر بشكل كبير جدًا، ويعد مصدرًا مهمًا للدوامات: لو جعلنا طبقة الدوامية تتذبذب على نحو ضعيف تحت تأثير اضطراب صغير، سنراها تلتف في حلزون لتعطي في النهاية مجموعة من الدوامات لها العلامة نفسها. وتسمى هذه الدوامات الحلزونية دوامات كلفن – هلمهولتز (Kelvin – Helmholtz). ولقد ذكر في المرجع iv (صفحة ٥٦ وما يليها) وفي المرجع v، المزيد من التفاصيل عن حالة عدم الاستقرار تلك. وتجريبيًا، يتم إنجاز طبقات جميلة جدًا من الخليط خلف حافة تسرب صفيحة رقيقة. إن تجارب وينانت (Winant) وبراوند (Browand) في الماء، وتجارب براون (Brown) وروشكو (Roshko) في خليط من الهليوم والأزوت، وكذلك العديد من أمثلة المحاكاة الرقمية، توضح أيضًا كيف أن دوامات متقاربة بما فيه الكفاية تدور الواحدة حول الأخرى بالحث المتبادل وتقترن معًا في دوامة أكبر مرتين. ونبين في الشكل ٤ (العلوي) عرضًا عيانيًا مستمدًا من تجربة براون (Brown) وروشكو (Roshko)، وهي ممثلة للمجال ρ. وتعد هذه التجربة الشهيرة أول إثبات لدوامات كلفن – هولمهولتز (Kelvin – Helmotz) بالنسبة لجريان ذي لزوجة منخفضة. ويبين الشكل ٤ (الجزء السفلي) المحاكاة الرقمية المباشرة ثنائية الأبعاد[١٣] التي أنجزها نورماند (Normand) في جرينوبل (Grenoble) لصبغة رقمية منقولة في طبقة خليط مهيأة حاسوبيًا مقدمًا بواسطة منحنى نظري للسرعة في مماس قطع زائد. إن نقاط التشابه مهمة، رغم أن الأمر لا يتجاوز حساب ثنائي الأبعاد بينما الحقيقة التجريبية ثلاثية الأبعاد. تبين الحسابات والأفلام التي صورت هذه التجربة بوضوح اقترانات بين الدوامات التي تتجذب بالتبادل وتندمج لتعطي دوامة أكبر مرتين. إنها اقترانات مشابهة لتلك التي رسمها صاحب الرؤى فان جوخ في "الليلة ذات النجوم" (راجع المرجع iv صفحة ٥٢).

---

(١٣)راجع لاحقًا التفاصيل التقنية لهذا النوع من المحاكاة.

فى الواقع، يوضح الشكل ٤ (الجزء العلوى) أن الطاقة أيضًا "تتساقط كالشلال" من المقاييس الكبيرة نحو المقاييس الصغيرة، حيث يمكن رؤية اضطرابًا كبيرًا ثلاثى الأبعاد. وسيتم لاحقًا دراسة هذه العملية المتفجرة لشلال الطاقة نحو الاضطراب المتنامى ذى المقياس الصغير (شلال ريتشاردسون - كولموجوروف Richardson – Kolmogorov).



الشكل (٤)

الجزء العلوى، صورة طبقة خليط مأخوذة من المرجع ٧ (بتصريح من أ. روشكو A. Roshko). الجزء السفلى، كمية عددية (غير موجهة) سلبية فى المحاكاة الرقمية المباشرة ثنائية الأبعاد لطبقة خليط (صورة مأخوذة من المرجع ٥ بتصريح من كلووير Kluwer).

لقد رأينا عدة أمثلة لما سنسميه "دوامات متماسكة". إن الأمر يتعلق بدوامات لها شكل قابل للتعرف عليه وتحتفظ بهذا الشكل لمدد طويلة إزاء انقلاب الدوامة.[١٤] وسنقابل لاحقًا أنواعًا أخرى من الدوامات المتماسكة (طولية، وعلى شكل "قوس"، وحلقات – دوامة) (الشكل رقم ٥).

لندرس الآن توزيع الضغط داخل الدوامة. إذا فرضنا أن جزءًا صغيرًا مائعًا يدور عند السطح الخارجى للدوامة وهو فى حالة اتزان تقريبى تحت تأثير القوة

---

(١٤) إنه الزمن الذى يستغرقه السائل عند السطح الخارجى للدوامة للقيام بدورة.

الطاردة المركزية (التى تنقله نحو الخارج) وقوى الضغط، يتعين أن تكون هذه القوى الأخيرة أقوى فى الخارج عنها فى الداخل، وتكون الدوامة إذن هى الحد الأدنى للضغط. ولا يكون هذا الارتباط، دوامة/انخفاض الضغط، صحيحًا إذا كان المائع هو نفسه فى معلم فى حالة دوران، مثل المجال الجوى (بالمقاييس الإجمالية الأعلى من ٥٠٠ كم) أو المحيطات الأرضية بمقياس الميزوسفير (من ٥٠ إلى ١٠٠ كم) مثلاً. فى هذه الحالة يتعين إضافة قوة كوريوليس (Coriolis)[١٥] لمحصلة القوى. عند المقاييس المذكورة، يوجد توازن تقريبى بين هذه القوة وممال الضغط[١٦] (توازن خاص بحركة الأرض). وبالتالى نجد أن الدوامات الإعصارية (أى التى تدور فى اتجاه دوران الأرض نفسه) تكون ذات ضغوط منخفضة، والأعاصير المعاكسة، أى التى تدور عكس اتجاه دوران الأرض، تكون ذات ضغوط مرتفعة، كما تؤكده لنا التوقعات المناخية يوميًا. وسنعود إلى هذه النقطة لاحقًا.

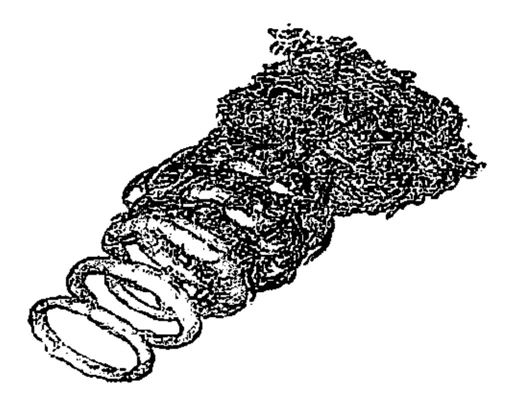
لنرجع إلى حالة دوامة فى معلم غير دوار. نرى أن تحليل حالات انخفاض الضغط أو تحليل مناطق الدوامية القوية هما المرشحان المحتملان لتحديد نوع وهوية الدوامة. فى الواقع، تثبت الدراسات بواسطة المحاكاة الرقمية لمعادلات نافييه - ستوكس (Navier – Stokes) (انظر لاحقًا) لجريان عند ثبات ▯، أن إحدى أفضل طرائق تحديد نوعية الدوامات هو الـ"معيار Q"، الذى اقترحه هانت وآخرون (.Hunt et al)، مميزًا المناطق المطابقة لأشكال متساوية المساحات وإيجابية بكمية مسماة Q مختارًا المناطق حيث يتغلب الدوران على تغير الشكل. نبين هنا تطبيق هذا المعيار فى محاكاة رقمية مباشرة لنفثة متحدة المحور (المكافئ المتماثل المحور لطبقة خليط) أجريت فى جرينوبل (Grenoble). تتحرك النفثة الداخلية أسرع من النفثة الخارجية. ونرى حلقات دوامية تقترن فيما بينها، مثل ما يحدث فى طبقات

---

(١٥) هذه القوة "الخيالية"، حيث لا وجود لها إذا تم العمل فى معلم جاليلى مطلق، تجعلنا ننحرف نحو اليمين إذا ركضنا على المضمار.

(١٦) فرق الضغط الجوى بين نقطة معينة ومحور الإعصار. (المترجم)

الخليط المستوية. وتولد هذه الاقترانات تمدد دوامات رقيقة طولية متعاقبة. إن هذه الدوامات هى مصادر مهمة للضجيج فى المحركات النفاثة للطائرة عند الإقلاع، وذلك نتيجة لما تسببه من تقلبات قوية فى الضغط. إن التطور التجارى لطائرات النقل الأسرع من الصوت المستقبلية[١٧] لا يمكن أن يتحقق طالما لم تكتشف مفاهيم جديدة لمحركات تسمح بالسيطرة على هذه الدوامات (بل واستبعادها). إنها مشكلة مركبة ومعقدة بشكل غير عادى ويتطلب حلها جهدًا بحثيًا ضخمًا.



الشكل (٥)

حلقات دوامية ودوامات طولية فى المحاكاة الرقمية لنفثة متحدة المحور غير مضغوطة (صورة C.Silva , LEGI, Grenoble).

اضطراب متنامى

يتطابق التطور المفاجئ للاضطراب نحو المقاييس الصغيرة، الذى نشاهده فى طبقات الخليط والنفثات، مع شلال ريتشاردسون - كولموجوروف (Richardson – Kolmogorov)، وهو آلية رئيسية تصنع "بشكل متفجر" الاضطراب ذا المقياس الصغير. فى عام ١٩٢٢، اقتبس ريتشاردسون (Richardson)، عالم الأرصاد الجوية البريطانى العبقرى، قصيدة جوناثان سويفت

(١٧) تطور حددته بشكل كبير نتائج لجنة التحقيق فى حادث الكونكورد المؤسف فى باريس يوم ٢٦ يوليو ٢٠٠٠.

(Jonathan Swift)[١٨] التى تقول: للبرغوث براغيث أصغر منه تتغذى على حسابه، ولهذه البراغيث الصغيرة براغيث أصغر تعضها، وهكذا يستمر كل شيء إلى مالا نهاية"، وكتب:" للدوامات الكبيرة دوامات صغيرة تتغذى من سرعتها، وللدوامات الصغيرة دوامات أصغر، وهكذا حتى اللزوجة". كما قام ريتشاردسون (Richardson)[١٩]، فى عام ١٩٢٦، بقياس مسافة الفصل v_r، لبالونين فى الغلاف الجوى، يبعدان عن بعضهما مسافة r، وأثبت أن مسافة الفصل تتناسب طرديًا مع $r^{1/3}$. وفى عام ١٩٤١، اقترح كولموجوروف (Kolmogorov) الذى كان يجهل، طبقًا لتلميذه ياجلوم (Yaglom)، أعمال ريتشاردسون (Richardson)، أن النسبة الموضعية لتبديد الطاقة υ_r^2 / T_r (حيث $T_r = r / v_r$ هو زمن الانقلاب الموضعى) مستقلة عنr وتساوى ε، ويقود ذلك إلى أن $(\varepsilon \quad r)^{1/3} \sim v_r$. فى "حيز فورييه "Fourier للترددات الحيزية $k\varepsilon \quad 1/ \quad r$، تتناسب كثافة الطاقة الحركية E(k) (طيف) فى نطاق الترددات المسموعة بوضوح $[k, k + \delta k]$ طرديًا مع $\varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$، مع ثابت تناسب C_k لا أهمية له. ولقد تم التأكد من صحة هذه النظرية بشكل تقريبى[٢٠] بالنسبة لأغلب حالات الجريان ذات عدد رينولدز (Reynolds) كبير،[٢١] سواء كان ذلك فى المحيط أو فى الطبقة الحدية للغلاف الجوى أو فى منافخ صناعة الطائرات. وأنهى هذا الفصل عن الاضطراب ثلاثى الأبعاد، بذكر نتائج عن تضاؤل الاضطراب موحد الخواص (أى الذى لا يتغير إحصائيًا بالدوران) تم الحصول عليها فى جرينوبل (Grenoble) (راجع لزيير Lesieur وأوشيا Ossia)

---

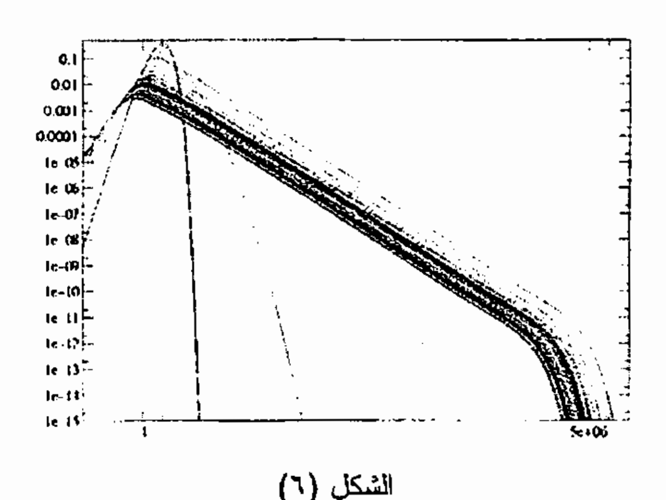
(١٨)كتبت هذه القصيدة للتنديد بلصوص الأفكار، وهو موضوع لا يزال من موضوعات الساعة، حتى فى العلوم.

(١٩)للمراجع الخاصة بريتشاردسون (Richardson)، راجع التجميع المهم جدًا لأعماله الكاملة (المرجع رقم x).

(٢٠)يقصد بشكل تقريبى المعنى التالى: إن أطياف الطاقة E (k) الممثلة برسم بيانى يسمى (لو–لو) تتبع خط ميل قريب من ٣/٥-، لكن الأطياف نفسها مضروبة فى $k^{5/3}$ وممثلة بإحداثيات شبه لوغاريتمية تكون بعيدة عن اتباع مستوى استقرار نسبى مثالى عند أعلى نقطة فى الرسم البيانى.

(٢١)يقيس هذا المعلم (بارامتر) النسبة بين الأزمنة المميزة لعمل القوى اللزجة وقوى القصور الذاتى.

بو اسطة نظر ية إحصائية أكثر تطور ًا و تعقيدً ا من نظر ية كو لمو جو ر و ف (Kolmogorov). إن الأمر يتعلق بنظرية EDQNM (باللغة الإنجليزية Eddy – Damped Quasi – Normal Markovian) حيث يفترض أن الاضطراب يبتعد قليلاً عن وضع جاوس[٢٢] (وهو ما يعني إهمال تأثير الدوامات المتماسكة على طيف الطاقة). يوضح الشكل رقم ٦، بإحداثيات لوغاريتمية اضمحلال طيف الطاقة لرقم رينولدز (Reynolds) أولي بحدود ١٠^٩، وهو رقم ضخم بالنسبة للمعمل أو البيئة، لكنه من الممكن أن يتوافق مع الشمس. ونرى تكوين شلال كولموجورروف Kologorov رائع لأكثر من خمس عشريات (في الواقع، يترجم قانون قوة الأعداد، في حالة الإحداثيات اللوغاريتمية بخط ميل بحيث يعبر خط الميل عن أس القوة)، وكذلك تكوين لموجة من طيف يتناسب مع k^4 بأعداد صغيرة. ولقد تم التحقق من صحة ذلك بالمحاكاة الرقمية للاضطراب.



الشكل (٦)

اضمحلال طيف الطاقة الحركية في حالة الاضطراب موحد الخواص، الذي تم دراسته بواسطة نظرية EDQNM. (مأخوذ من المرجع ١٦)

---

(٢٢)منحنى جاوس له شكل جرس. (المترجم)

لنعطي الآن بعض التفاصيل عن أدوات المحاكاة الرقمية.

محاكاة رقمية مباشرة (SND)

يتعلق الأمر بحل رقمي حتمي لمعادلات الحركة: تحدد شبكة خطوات (Δx , Δt) في نطاق الحساب في الزمكان. يمكن أن تكون هذه الخطوات متغيرة وأن تكون الشبكة في الفراغ غير المتعامد. ويتم حساب العامل الرياضي للمُشتقة الجزئية للزمن بفضل عمليات بسط لمتسلسلة تايلور بأسس خطوة الزمن Δt. ويتم حساب العوامل الرياضية للمشتقة الجزئية للحيز سواء بالطرائق الطيفية المذكورة عاليه إذا كانت الهندسة تسمح بذلك (الدورية في اتجاه ما،على سبيل المثال)، أو بعمليات بسط متسلسلة تايلور بأسس Δx. وستكون الحسابات أكثر دقة كلما كانت رتبة عمليات البسط أعلى. وتعتبر الرتبة ٣ ممتازة بالنسبة للمشتقات الزمنية. أما بالنسبة للمشتقات الحيزية فمن المفيد أخذ الرتبة الأكثر ارتفاعًا قدر الممكن فيما يتعلق بالحدود غير الخطية للمعادلات (وتكون الرتبة ٦ بهذا الخصوص أفضل بكثير من اثنين). في عمليات المحاكاة هذه، يتم التقدم في الزمن بالطريقة التالية: تسمح معرفة المتغيرات عند اللحظة t واللحظة $t-\Delta t$ بحساب هذه المتغيرات عند اللحظة $t+\Delta t$، وهكذا دواليك. في الواقع، إن عمليات المحاكاة الرقمية المباشرة تفرض عرض كل مقاييس الجريان ذات الطاقة الكافية على الحاسوب، من أصغرها إلى أكبرها. في نظام اضطرابي متطور، تكون أصغر المقاييس بحدود مقياس تبديد الطاقة l_D. ويمكن إثبات أن ذلك يحد، في الواقع، المحاكاة الرقمية المباشرة بحالات الجريان ذات رقم رينولدز (Reynolds) ضعيف مقارنة بالمواقف الحقيقية. إن الحسابات النمطية للاضطراب (من ١ إلى مائة مليون نقطة شبكة في الفراغ) تستغرق ما بين عدة عشرات إلى عدة مئات من الساعات على أكبر الحاسبات العلمية. إن المحاكاة الرقمية المباشرة ستقتصر، في الواقع، على المواقف– المعيار، للتحقق من صحة الطرائق الأخرى للمحاكاة أو لوضع النماذج.

وأخيرًا، لنتذكر التقدم المهم المنتظر تحقيقه مع الأجهزة المتوازية، حيث يتم حساب الجريان فى مختلف أجزاء مجال الحساب فى آن واحد.

محاكاة المقاييس الكبيرة

فى مفهوم محاكاة المقاييس الكبيرة (SGE)، تكون خطوة الحساب Δx أكبر من المقياس اللزج l_D. ويتم دراسة مجالات تخلصت من تقلباتها ذات الطول الموجى الأقل من Δx، وذلك بتعريض المجال المضطرب لمرشح لا يمرر إلا موجات عرضها Δx.إن الصعوبة الأولى تأتى من أننا لا نعرف المعادلات التى تتحقق بالمجالات التى تم ترشيحها.إنها مشكلة المرور من الـ"ميكرو"، أى الدقيق جدًا الذى لا يرى بالعين المجردة، إلى الـ"ماكرو"، أى العيانى الذى يرى بالعين المجردة، حيث معادلات الوسط الميكروسكوبى معروفة، ألا وهى نافييه – ستوكس (Navier-Stokes). ولنتذكر أن هذه المعادلة الأخيرة تنجم أيضًا من المرور من ظاهرة "ميكروية" (معادلة بولتزمانBoltzmann للديناميكا الجزيئية) إلى ظاهرة "ماكروية" (جريان المائع) عن طريق فرضية الوسط المتصل وإدخال اللزوجة الجزيئية المتناسبة طرديًا مع حاصل ضرب متوسط المسار الحر وسرعة اضطراب الجزيئات. إن فرضية اللزوجة الجزيئية هذه مبررة بفصل المقاييس القائمة بين الجزيئات والوسط المتصل.

بالقياس، يفترض أن المجال الذى مر من خلال المرشح هو مائع تكون جزيئاته حركات ذات مقياس مساوٍ أو أقل من Δx، وتؤثر هذه الحركات على كمية حركة المجال الذى مر من خلال المرشح، وذلك بطريقة غير مباشرة بواسطة اللزوجة المضطربة، التى تساوى حاصل ضرب "مسار" المقاييس الأقل من Δx وسرعة الإثارة المضطربة لهذه المقاييس. إن تحديد هذه السرعة أمر صعب، خاصة أنه لم يعد هناك فصل للمقاييس. ولحل هذه المشكلة الصعبة، نعمل فى جرينوبل (Grenoble) فى حيز فوربيه (Fourier). وهناك، تتطابق المقاييس الأقل

من Δx مع أعداد موجية أعلى مـن $k_c = \pi / \Delta x$. ونجـد أن اللزوجـة الطيفيـة المضطربة تنضبط على صيغة ٦. ولقد حددناها، تحليليًا ورقميًا، باستخدام نمـوذج EDQNM المذكور عاليه. عندما نعمل فى الحيز الفيزيائى، فإن ذلك يعنى إضافة إلى اللزوجة المضطربة التقليدية "لزوجة فائقـة" حيـث يتكـرر عامـل لابـلاس (Laplace) المرتبط باللزوجة ثلاث مرات (راجع مرجع ٤ صفحة ٣٢ للحـصول على تعريف). فيما يتعلق بحالات محاكاة المقاييس الكبيرة للغازات المثالية القابلـة للانضغاط، يجرى العمل بمساعدة أرقام قياسية تفاضلية مـن خـلال كتلـة فـافر (Favre)، وهى طريقة تبسط الحسابات بشكل كبير. وعلى هذا الأسـاس، يكمـن ابتكارنا فى إدخال مفاهيم الضغط الماكروى والحرارة الماكروية، وهـى كميـات ترتبط فيما بينها بمعادلة حالة.

أمثلة محاكاة المقاييس الكبيرة

سنقدم الآن بعض أمثلة محاكاة المقاييس الكبيرة التى أجريت فى جرينوبـل (Grenoble)، والتى تم توضيحها فى المحاضرة بواسطة أفلام:

– طبقة ثلاثية الأبعاد لخليط غير قابل للانضغاط: كان الحساب المعـروض سابقًا ثنائى الأبعاد. إننا نبين الآن فى الشكل رقم ٧ (انظر خارج الـنص) حـساب محاكاة المقاييس الكبيرة ثلاثية الأبعاد، مفروضًا عليـه مـن أعلـى اضـطرابين ضعيفين احتماليين لهما السعة نفسها، أحدهما ثنائى الأبعاد والآخر ثلاثى الأبعـاد. ويتم إظهار شكل متساوى السطح لمعيار الدوامية بطريقة مرئية بـاللون الرمـادى الفاتح. ونرى كيف تفقد طبقة الدوامية العليا استقرارها إلى دوامات من نوع كلفن- هلمهولتز (Kelvin- Helmholtz) ذات محور موجه تبعًا للمدى. ونرى أيضًا، كما فى حالة النفثة المتوحدة المحور المعروضة سابقًا، دوامات طوليـة شـديدة جـدًا ممطوطة بين الدوامات الأولية. كان هذا النوع من البنية قد رصده تجريبيًا برنـال (Bernal) وروشكو (Roshko). إذا أعدنا هذه المحاكاة مع الاضـطرابات العليـا

نفسها، لكن مع نطاق أوسع تبعًا للمدى، فإن هذه الطوبولوجيا[٢٣] الدوامية تتغير، وتتفكك دوامات كلفن – هلمهولتز (Kelvin – Helmholtz).

– نفثة مستديرة: يعرض الفيلم نفثة صادرة عن فتحة دائرية، حيث يمكن رؤية حلقات دوامة متوازية تقريبًا (التى تشكل دوائر دخان المدخن). هنا يكون التدخل الاصطناعى احتماليًا، وهو ما يقود الحلقات إلى أن تنحنى بالتناوب على محورها وأن تقترن موضعيًا ("اقتران متناوب"، راجع المرجع ٤ ص١١٥). ويؤدى ذلك إلى بنية دوامية ذات خط حلزونى مزدوج. وكما رأينا سابقا، تعد دراسة التحكم فى النفثات القابلة للانضغاط مسألة جوهرية لضبط محركات الطائرات والصواريخ، وتقليل الضجيج المفرط الذى تسببه الطائرات عند الإقلاع.

– طبقات حدية على صفيحة مستوية: نبين هنا الاضطراب المتنامى فى حساب أجرى فى جرينوبل (Grenoble) (عدد ماخى ٠,٣). يوضح تحريك الرسم أن البنية المتماسكة الأكثر وضوحًا هى نظام من التيارات ذات سرعة طولية عالية ومنخفضة، قرب الجدار. كما نرى أيضًا، بفضل الأسطح ذات الضغط المنخفض أعلى التيارات ذات السرعة المنخفضة، عمليات قذف لدوامات مقوسة ترتبط من جديد بالجدار بواسطة دوامات شبه طولية، سبق الإشارة إليها فى المقدمة. ويساوى قطرها حوالى ٢٥ وحدة جدار[٢٤]. يبين الشكل رقم ٨ إحدى هذه الدوامات، حيث تم إظهار مناطق انخفاض الضغط (باللون الأبيض) وخيوط الدوامة. ونرى أن هذه الخيوط أكثر تقاربًا بكثير فى إحدى ساقى الدوامة عنها فى الساق الأخرى، وهو ما يفسر فى الواقع الطابع غير المتماثل بشدة للدوامة. فى الحقيقة، يمكن تقليل الاحتكاك على الجدار لو لصق عليه تكسية مصنوعة من حزوز طولية دقيقة يتم اختيار حجمها بعناية. لقد تم تزويد بعض طائرات الإيرباص بهذه التكسية، وكذلك العوارض الرئيسية التى تمتد على طول قعر المركب الشراعى[٢٥] ويستند عليها،

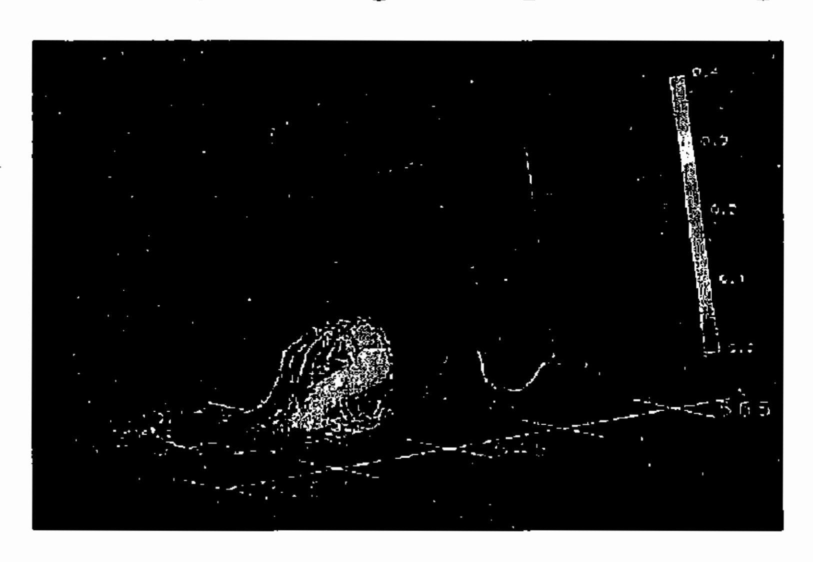
---

(٢٣)دراسة الخصائص الهندسية التى لا تتأثر بتغير الحجم أو الشكل. (المترجم)

(٢٤)إنه مقياس تبديد خاص بالجدار، بحدود واحد ميكرون فى الهواء ومائة ضعف بالنسبة للماء.

(٢٥)يعتبر كأس أمريكا الذى فاز به دنيس كونر عام ١٩٨٦مثالاً شهيرًا على ذلك.

والجنيحات العمودية الغاطسة فى الماء للألواح الشراعية ("جلود سمك القـرش"). والأكثر حداثة، أن بعض السباحين المشتركين فى السباقات اسـتخدموا مايوهـات طويلة جدًا (من الرقبة إلى الكاحل) تحتوى على هذه الحزوز، ممـا أثـار جـدلاً بمناسبة ألعاب سيدنى القادمة. ويتراوح العرض الأمثل لهذه الحـزوز، الـذى تـم تحديده فى البداية بشكل تجريبى، بين ١٠ إلى ٢٠ وحدة جدار.



الشكل (٨)

دوامات شبه طولية ومقوسة فى محاكاة رقمية للقياسات الكبيرة لطبقة حدية عند ٠,٥ ماخ (F.Ducros, Grenoble صورة).

فى الواقع، لقد أثبت شوا وآخرون (Choi et al.)، بواسـطة أداة المحاكـاة الرقمية المباشرة، أن الدوامات الطولية، لمثل هذا الحجم من الحزوز، تكون كبيـرة جدًا لكى تستقر فى "الأودية"، ولا تكون فى حالة تلامس مع الجدران إلا عند زوايا التقاطع. وبالتالى يكون معامل الاحتكاك أقل بنسبة ٨٪ مقارنة بجدار أملس. وعلى النقيض من ذلك، لو أخذنا حزوزًا أعرض من عرض الدوامات، فسوف تستقر هذه الدوامات فى قعر الحزوز، ويصبح الاحتكاك أكثر شدة وقوة.

- جريان على تجويف متوازى الأسطح عند ٠،٩ ماخ (سرعة قريبة من سرعة الصوت): نرى دوامات مقوسة كبيرة تتولد أعلى التجويف وتنتقل نحو الأسفل. فى مجال علم الطيران، تمثل هذه الدوامات مصادر ضخمة للضجيج، كما يمكن أن يسبب تأثيرها على الهياكل أضرارًا. ويمكن لهذه الدوامات أن تكون أيضًا مصدرًا لثغرات خطيرة فى قوة الرفع عند تفاعلها مع الصدمات.

- المكوك الفضائى الأوروبى هرمس (Hermès): لقد شاركنا فى هذا البرنامج، الذى تم التخلى عنه للأسف قبل الأوان، ونجحنا فى عام ١٩٩٣، فى إطار هذا البرنامج، فى إنجاز أول محاكاة لمقاييس كبيرة فى العالم فى مجال صناعة الطيران، وهى محاكاة الجريان على الجنيح الخلفى عند الدخول إلى المجال الجوى للأرض. ويوضح الشكل رقم ٩ (انظر خارج النص) الدوامات الطولية العنيفة التى تم الحصول عليها بواسطة هذا الحساب (حيث العدد الماخى الموضعى ٢،٥) والناجمة عن عدم ثبات من النوع الطارد المركزى (راجع المرجع ٤ صفحة ١٣٨). بالنسبة لعملية طيران حقيقى، يوضح حساب بسيط، يعتمد على مبدأ برنولى (Bernoulli) لحالات الجريان القابل للانضغاط دون حدوث تبادل حرارى (راجع المرجع ٤ صفحة ٤٥)، إن درجات الحرارة عند الجدار قد تبلغ حوالى ٣٠٠٠ كلفن إذا أعادت الدوامات إلى الجدار مائعًا خارجيًا. إن ذلك أعلى بكثير من الـ ١٥٠٠ كلفن التى تتقبلها المادة، مما يهدد إذن بإتلافها، وهو ما يعرض المركبة الفضائية لخطر حقيقى. ولنسجل أن النماذج الرقمية الصناعية الخاصة بتصور المكوك لم تتوقع هذه الدوامات.

محاكاة العواصف

أعرض الآن أعمال محاكاة رقمية مباشرة ومحاكاة رقمية لمقاييس كبيرة قام بها فريقنا فى جرينوبل (Grenoble) ونشرها منذ عدة سنوات جرانييه وآخرون (Garnier et al.)، وتمثل نتائجها نقاط تشابه قوية مع العواصف التى ضربت فرنسا يومى ٢٦ و٢٨ ديسمبر ١٩٩٩. يتعلق الأمر بمحاكاة ثلاثية الأبعاد لمائع فى

حوض دوار، مع تقسيم إلى طبقات حرارية رأسية ثابتة، وتقسيم إلى طبقات أفقية شمال (بارد)/ جنوب (ساخن). إن المعادلة التى تم محاكاتها هى معادلة نافييه – ستوكس (Navier – Stokes) مع تقريب بوسينك Boussinesq كما يسمى، وهو تقريب ممتاز بالنسبة لأخذ هذه التأثيرات الخاصة باختلاف الكثافة فى الاعتبار، ولا يفترض حدوث "توازن السوائل" طبقًا لخط المراقبة العمودى[٢٦] الخاص بشفرات التوقع المناخى ذات المقاييس الإجمالية (عدة مئات أو عدة آلاف من الكيلومترات). وكانت معالم (بارامترات) الحساب تتطابق مع قيم مناخية نمطية لهذه المقاييس. وتبين المحاكاة الرقمية المباشرة تكوين دوامات إعصارية أولية متماسكة جدًا باتجاه خط المراقبة العمودى وطولها الموجى ٨٠٠ كيلومتر. وتكون دوامات الإعصار المعاكس[٢٧] ضعيفة وثلاثية الأبعاد. تشكل الدوامات الإعصارية عند أرض وقمة نطاق الحساب جبهات حرارية حيث يشاهد اشتداد قوى جدًا للدوامية الإعصارية الرأسية (راجع تحريك الرسوم، مأخوذ من لزيير وآخرين .Lesieur et al). إن التفسير الذى نقدمه هو التالى: فى الجبهة القريبة من الأرض، يرتفع الهواء الساخن فوق الهواء البارد، مستحثًا تولد دوامية إعصارية بشكل قوى نتيجة دوران العلامة، ويمكن فهم ذلك بتطبيق مبدأ نيوتن الثانى الخاص بالحفاظ على العزم الحركى فى علامة جاليليوية مطلقة. أما عند القمة، فإن الهواء البارد هو الذى ينزل تحت الهواء الساخن، مع المزيد من اشتداد الدوامية الإعصارية. إن المحاكاة الرقمية المباشرة تكون، فى الواقع، لزجة جدًا لكى تسمح بنمو حالات عدم استقرار ثانوية على الجبهة، على نقيض محاكاة المقاييس الكبيرة حيث يتم رصد هذه الحالات. يوضح الشكل رقم ١٠، المستمد من المرجع ٢٥ والمرجع ٢٦، هذه الظاهرة، كما يوضح تشكل دوامتين إعصاريتين ثانويتين خلال يومين. إن دوامية كل منهما أكبر مرتين تقريبًا من دوامية الدوامات الأولية. وفيما يتعلق بعواصف ديسمبر الماضى، توضح صور الأقمار (المرجع 27) وجود اضطراب فى شكل دوامة كبيرة تجاه

---

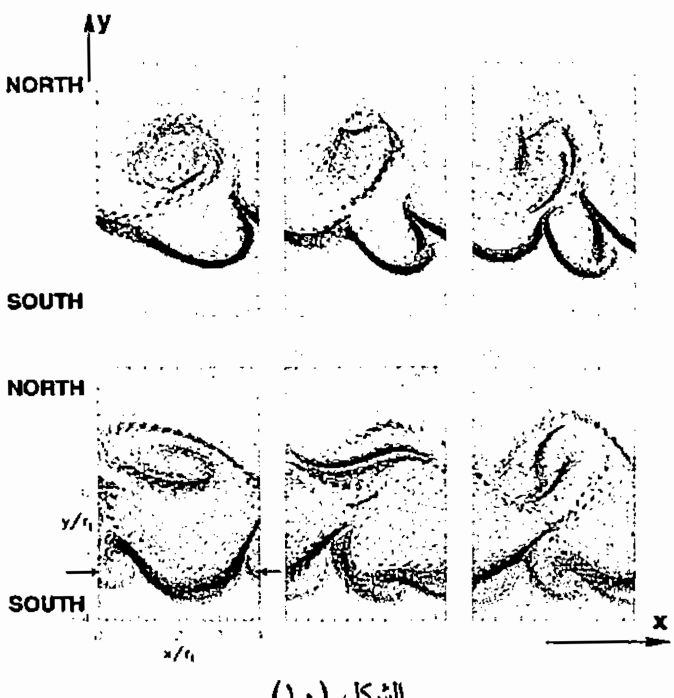
(٢٦)تفترض هذه الفرضية أن الضغط عند نقطة ما يحسب ببساطة بوزن عمود السائل فوق هذه النقطة.

(٢٧)منطقة يرتفع فيها الضغط الجوى نسبيًا عمّا حولها. (المترجم)

ساحل النرويج، مساء ٢٥ ديسمبر. وتستحث هذه الدوامة جبهة باردة تقطع فرنسا إلى نصفين[٢٨]. وانطلاقًا من هذه الجبهة تطورت عواصف ٢٦ و٢٨ ديسمبر التى عبرت الجزء الشمالى من فرنسا من الغرب إلى الشرق. بعد الاطلاع على نتائجنا السابقة، كان من المغرى ربط هذه العواصف بتطور حالات عدم الاستقرار الثانوى على جبهة ما. لم يكن ذلك هو التفسير الذى أعطاه مناخ – فرنسا (Météo – France) على موقعه على الشبكة، حيث قدمت العواصف الثلاث (٢٥، و٢٦، و٢٨ ديسمبر) على أنها بالأحرى حالات عدم استقرار أولية عبرت المحيط الأطلنطى. إذا اتضح أن تفسيرنا صحيح، سيتعين التفكير فى نوع الشفرة (الكود) المناخية اللازمة لوضع النموذج الرقمى الضرورى للتنبؤ، المعتمد على التحليل الحسابى لأشباه الأعاصير تلك، مع العلم أن حساباتنا الخاصة بمحاكاة المقاييس الكبيرة للحصول على حالات عدم استقرار ثانوية لم تكن هيدروستاتيكية[٢٩] واستخدمت طرائق رقمية من الرتبة السادسة عموديًا مع شبكة من ٢٠ نقطة فى هذا الاتجاه. وبلا ريب، يتعين التوجه بالنسبة للتنبؤات الشاملة نحو استعمال شفرات الحساب المستخدمة حتى الآن للتنبؤات المحلية.

(٢٨)فى اللحظة نفسها، كان هواء جنوبى ساخن يهب على جرينوبل (Grenoble).

(٢٩)خاص بتوازن السوائل وضغطها. (المترجم)



الشكل (١٠)

محاكاة المقاييس الكبيرة للعواصف: تطور مجال الحرارة عند الأرض فى حساب جرانييه وآخرين .Garnier et al (مرجع ٢٦). يتحرك الزمن من اليسار إلى اليمين ومن أعلى إلى أسفل. مجموع التطور المبين يمثل يومين.

الرهانات الكبرى

فلنحاول استخلاص الرهانات الكبرى التى تطرحها"ميكانيكا الموائع"، وهى رهانات ستشغل العديد من الباحثين والمهندسين فى العالم أجمع خلال القرن الذى يبدأ.

من منظور الطاقة، تعتبر معرفة كيفية التحكم فى الموائع والدوامات فى مجال الديناميكا الهوائية (سيارات، قطارات، طائرات)، وفى المحركات وغرف الاحتراق، وفى المجال النووى (انشطار وانصهار)... أمرًا حيويًا. من الممكن أن نأمل فى تحقيق مكاسب بحدود ٣٠ ٪.

إن التحكم فى الموائع أمر حتمى لتقليل الأضرار السمعية والتلوث.

تمثل المحاكاة الرقمية ووضع النماذج الرقمية أدوات لا مثيل لها للسيطرة والتحكم. يجب أن يتم التأكد من صحة هذه النماذج، التى تطورت فى إطار متعدد التخصصات العلمية (ميكانيكا، فيزياء، رياضيات تطبيقية، معلوماتية، علوم الأرض والكون، هندسة كيمائية)، بواسطة التجارب الملائمة. كما تتيح المحاكاة الرقمية ووضع النماذج الرقمية القيام بدراسات دقيقة غير ثابتة لظواهر قصوى تمحوها النماذج المعدة.

فى مجال التنبؤ بالأحوال الجوية، يجب تكثيف الأبحاث الخاصة بالعواصف، وامتلاك نماذج دقيقة تحسن من التنبؤ بها. يمكن أن ينقذ ذلك أرواحًا ويحد من الدمار.

إن اتساع المهمة يجعل من الضرورى العمل (على الأقل) فى إطار البرامج الأوروبية، مع إنشاء مركز أوروبى للأبحاث الخاصة بالتحكم فى الاضطراب، ولما لا. إن التكاليف التى يتطلبها إنشاء وتشغيل مثل هذا المركز غير ذات بال مقارنة بالمنافع المتوقعة.

شكر

إنى أتوجه بالشكر إلى P.Begou, E.Briand, P.Comte, Y.Dubief, F.Ducros, E.David, E.Garnier, O.Métais, S.Ossia, C.Silva, G.Silvestrini لإسهامهم فى هذا العمل، المدعوم من المؤسسة الجامعية لفرنسا، والـ CEA، والـ CNRS، والـ INPG، والـ UJF.

المراجع:

1. NAVIER (M.), *Mémoire sur les lois du mouvement des fluides*, présenté à l'Académie des Sciences, Paris, 1822.
2. FOURIER (J.), *La Propagation de la chaleur dans les corps solides*, Mémoire présenté le 21 décembre 1807 à l'Institut National, 1807.
3. POISEUILLE (J.), *Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans des tubes de très petits diamètres*, C. R. Acad. Sci., Paris, 1841.
4. LESIEUR (M.), *La Turbulence*, Collection Grenoble Sciences, Presses Universitaires de Grenoble, 1994.
5. LESIEUR, (M.), *Turbulence in fluids*, 3e édition, Kluwer, 1997.
6. WINANT (C. D.) et BROWAND (F. K.), « Vortex pairing, the mechanism of turbulent mixing layer growth at moderate Reynolds number », *J. Fluid Mech.*, **63**, 1974, p. 237-255.
7. BROWN (G. L.) et ROSHKO (A.), « On density effects and large structure in turbulent mixing layers », *J. Fluid Mech.*, **64**, 1974, p. 775-816.
8. NORMAND (X.) 1990, Thèse de l'INP Grenoble.
9. HUNT (J. C. R.) WRAY (A. A.) et MOIN (P.), *Eddies, Stream, and Convergence Zones in Turbulent Flows*, CTR-88, Center For Turbulence Research, 1988, p. 193.
10. RICHARDSON (L. F.), *Œuvres complètes : Vol I, Meteorology and numerical analysis*, P. G. Drazin ed., Cambrifge University Press, 1993.
11. KOLMOGOROV (A.), « The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for very large Reynolds Numbers », *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **30**, 1941, p. 301-305.
12. YAGLOM (A.), 2000, « A century of Turbulence », in *New trends in turbulence*, Les Houches 2000, M. Lesieur éd., EDP-Springer, à paraître.
13. GRANT (H.), STEWART (R.) et MOILLIET (A.), 1962, *Turbulent Spectra from a Tidal Channel*, *J. Fluid Mech*, **12**, p. 241-268.

14. CHAMPAGNE (F.), FRIEHE (C.), LARUE (J.) et WYNGAARD (J.), « Flux Measurements, Flux Estimation Techniques And Fine-scale Turbulence Measurements in the Unstable Surface Layer over Land », *J. Atmos, Sci.*, 34, 1977, p. 515-530.
15. LESIEUR (M.) et ROGALLO (R.), « Large-Eddy Simulation of Passive-scalar Diffusion in Isotropic Turbulence », *Phys. Fluids A*. **1**, 1989, p. 718-722.
16. LESIEUR (M.) et OSSIA (S.), « 3D isotropic turbulence at very high Reynolds number EDQNM study », *J. of Turbulence*, **1**, 2000, 7.
17. OSSIA (S.) et LESIEUR (M.), « On Energy Backscatter in Large-Eddy Simulations of Isotropic Incompressible Turbulence », soumis à *J. of Turbulence* 2000.
18. LESIEUR (M.) et MÉTAIS (O.), « New trends in Large-Eddy Simulations of Turbulence », *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **28**, 1996, p. 45-82.
19. FAVRE (A.), J. de Mécanique, 4, 1965, p. 361.
20. *Turbulence et Déterminisme*, M. Lesieur éd., Collection Grenoble Sciences, Presses Universitaires de Grenoble 1998.
21. BERNAL (L. P.) et ROSHKO (A.), « Streamwise Vortex Structure in Plane Mixing Layer », J. Fluid Mech., **170**, 1986, p. 499-525.

22. Ducros (F.), Comte (P.) et Lesieur (M.) « Large-Eddy Simulation of Transition to Turbulence in a Boundary-Layer Developing Spatially over a Flat Plate », *J. Fluid Mech.*, **326**, 1996, p. 1-36.
23. Choi (H.) Moin (P.) et Kim (J.) « Direct-numerical Simulation of Turbulent Flow over Riblets », *J. Fluid Mech.*, **225**, 1993, p. 503-539.
24. David (E.), Thèse de l'INP Grenoble 1993.
25. Garnier (E.), Métais (O.) and Lesieur (M.), « Instabilités primaire et secondaire d'un jet barocline », *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **323**, Ser. II b, 1996, p. 161-168.
26. Garnier (E.) Métais (O.) et Lesieur (M.), « Synoptic and Frontal-Cyclone Scale Instabilities in Baroclinic Jet Flows », *J. Atmos. Sci.*, **55**, 1998, p. 1316-1335.
27. Lesieur (M.), Métais (O.) et Garnier (E.), « Baroclinic instability and severe storms », *J. of Turbulence*, **1**, 2000, p. 2.

علم التبلّر وعلم شبه التبلّر[٣٠]

بقلم: دنى جراتيا

Denis GRATIAS

ترجمة: لبنى الريدى

إن "البلّورة" هى مادة صلبة تتوزع ذراتها بطريقة دورية ثلاثية الأبعاد فى الفراغ. وقد أضاف الاتحاد الدولى لعلم التبلّر (IUCr) فى عام ١٩٩١ إلى هذا التعريف، الذى يرجع إلى بداية القرن العشرين، تعريف "البلّورة غير الدورية" (cristal apériodique)، وهى مادة صلبة بدون دورية ثلاثية الأبعاد لكنها تبدى طيف حيود منفصل أساسًا. إنها الأطوار غير المتناظرة، التى اكتشف أول مثال لها ليند (Linde) وجونسون (Johnson)، عام ١٩٣٦، وأشباه البلّورات التى اكتشفها دانى ششتمان (Dany Shechtman)، عام ١٩٨٢. لقد قلب القادمون الجدد مشهد علم التبلّر رأسًا على عقب مما أدى إلى علم شبه التبلّر، أو علم التبلّر ذى الأبعاد N حيث N رقم صحيح أكبر من ٣.

ويعتمد علم التبلّر على مفهوم التماثل أى الثابتية (invariance). ونجد هذا المفهوم فى الفيزياء فى سياقات متعددة. بدءًا من الثابتية الهندسية البسيطة لتراكب الجسم على نفسه، إلى تعريف المقادير الأولى لنظام ميكانيكى، أو تعريف معادلة حالة، فإن التماثل هو الترجمة المنطقية لإسهاب الطبيعة التى لا تسمح إلا بوصف يمثل الحد الأدنى له، ولا يكون التماثل ضروريًا فى أى مكان لكنه نافع فى كل مكان. ويستخدم علم التبلّر التعبير الأولى جدًا للتماثل، الذى يمكن مباشرة إبصاره هندسيًا، وتكون عناصره هى حالات تساوى القياس الخاص بالفراغ الإقليدى: التعاكس، والدوران، والانعكاس فى المرآة، والتى يضاف إليها الانتقال فى الفراغ،

---

(٣٠)نص المحاضرة رقم ٢٢٢ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٩ أغسطس ٢٠٠٠.

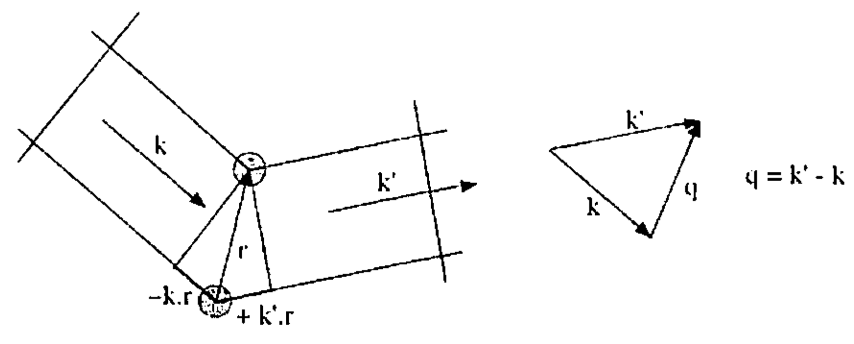
بافتراض أن البلّورة المثالية تكون لانهائية. إن تحريك بلّورة بعـــدد صـــحيح مـــن المرات لأى من دوراتها يعنى التطابق معها تمامًا. إنها إحدى عمليات الثباتية.

إن مجموع كل الحركات الانتقالية للبلّورة هى عائلة المتجهات التى تعبر عن نفسها كمجموع الدورات الثلاث الأساسية ذات المعاملات "الصحيحة". إنهـــا تـــسمى "الشبكة"، وهى مجموعة الحركات الانتقالية للبلّـــورة. وتحـــدد المتجهـــات الثلاثـــة الأساسية التى تولد هذه الشبكة متوازى أضلاع يسمى "الحلقة الأوليـــة". إن وصـــف البلّورة بالمقياس المجهرى يرتكز على وصف هذه الحلقة بإعطاء أطوال أضـــلاعها، والزوايا بين ثلاثة من أضلاعها المتلاقية وتحديد ما يسمى بـــالنموذج، أى الطبيعـــة الكيميائية ومواضع الذرات التى تضمها. ويتم بعد ذلك بناء البلّورة العيانية، أى التى ترى بالعين المجردة، وذلك بمجرد مضاعفة هذه الحلقة إلى ما لانهاية، بإزاحتها فى كل مرة طبقًا لمتجه من متجهات الشبكة. والجسم الذى يتم الحـــصول عليـــه بهـــذه الطريقة يملأ الفراغ، بمعنى أن كل حلقة تكون ملاصقة لجارتها، ولا يمثل المجموع أية فجوات أو انطباقًا (راجع الشكل رقم ١ خارج النص).

لوجود الشبكة البلّورية نتائج مهمة:

– النتيجة الأولى ذات طابع هندســـى. إن حـــالات تماثـــل دوران البلّـــورة بزاويـــة θ تترك الشبكة ثابتة أو يكون تغيرها صفرًا، إذ يتعين عليها تحويل كـــل متجه ذى إحداثيات صحيحة إلى متجه ذى إحـــداثيات صـــحيحة. ويتـــرجم ذلـــك، بالنسبة للأبعاد الثنائية والثلاثية، بالقاعدة الهندسية الإجبارية التى تفرض أن يكـــون $2\cos\theta$ عددًا صحيحًا. ولا يمكن توفر ذلك إلا بالنسبة للزوايا التالية:

θ = صفر، ٣/ π، π/٢، π/٣ ٢، π، ولها فقط: إن البلّورات لا تستطيع أن تمثل سوى حالات تماثـــل ثنائيـــة (π)، و"ثلاثيـــة" (π/٣ ٢)، و"رباعيـــة" (π/٢)، و"سباعية" (π/٣). وهكذا تم تصنيف البلّورات إلى سبعة نظم بلّورية موزعة علـــى ٣٢ مجموعة تماثل اتجاه، و٢٣٠ مجموعة تماثل فراغى (الشكل رقم ٢).

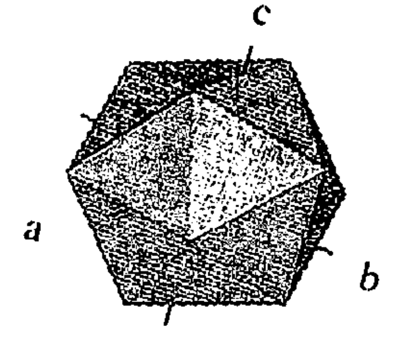


الشكل (٢)

حيود بلّورى: لا تنعكس حزمة ساقطة لها متجه موجة K فى الاتجاه K'
بواسطة أى نموذجين لبلّورة تبعد مسافة r، إلا عندما يكون فرق تقدمهما
أحد مضاعفات ٢ π، مثل عندما يكون متجه الموجة
q = K' – K هو متجه للشبكة المقابلة للبلّورة. (انظر النص).

– إن النتيجة الثانية للدورية ذات طابع فيزيائى. عندما نرسل حزمة أحادية الطول الموجى من الجسيمات (فوتونات، إلكترونات، نترونات، إلخ) على بلّورة، تحدث ظاهرة "حيود" (الشكل رقم ٣): كل ذرة من البلّورة توزع الجسيمات الساقطة فى جميع الاتجاهات، بحيث يؤدى التداخل بين المويجات المنبعثة إلى أن تدمر كل منها الأخرى، إلا عندما تكون كل تغيرات الطور بين المويجات ذات عدد صحيح من مضاعف ٢ π، عندئذ تكون التداخلات بناءة وتولد حيودًا. وتحدث هذه الظاهرة عندما يكون متجه الموجة الناشىء من الفرق بين متجه الموجة الخاص بالموجة الساقطة والموجة المنكسرة متجهًا، ويكون حاصل ضربه غير الموجه مع عمليات نقل الشبكة عددًا صحيحًا. إن متجهات الموجة التى تملك هذه الخاصية تشكل شبكة، وتكون هذه الشبكة ثنائية للشبكة البلّورية، وتسمى "الشبكة المقابلة". ومن ثم تنقسم الحزمة الساقطة، بالنسبة لبعض اتجاهات البلّورة، إلى مجموعة من الحزم المنكسرة تنتمى متجهات موجاتها للشبكة المقابلة: يقال إن طيف الحيود

منفصل. تعتبر هذه الخاصية أساسية لدرجة أن رصد طيف حيود منفصل كان، حتى فترة قريبة، بمثابة توقيع للدورية البلّورية.



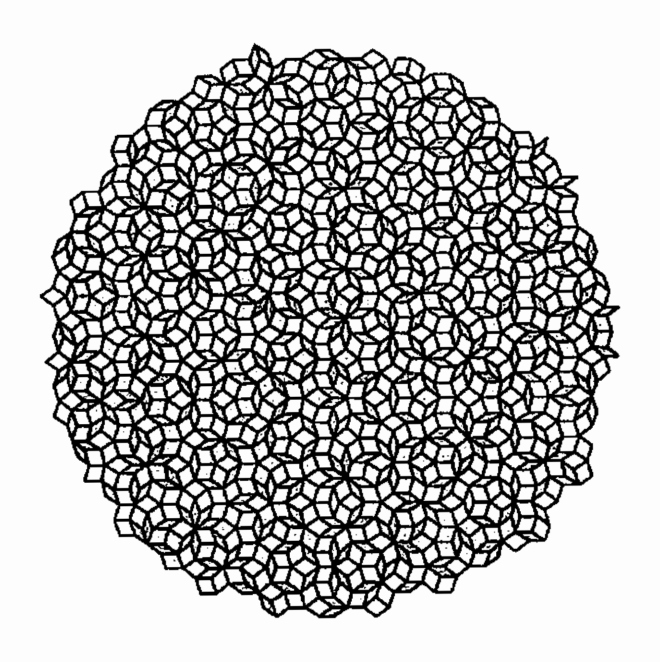
شكل (٣)

صورة لحيود إلكترونات سبيكة لها عشرون وجهًا توضح تماثلاً خماسيًا متناقضًا مع الدورية البلّورية.

لقد كان لإعلان اكتشاف أشباه البلّورات، عام ١٩٨٤، تأثير الثورة (الشكل رقم ٤): تمثل أشباه البلّورات أشكال حيود متكونة من نقاط ذات تمييز دقيق مثل البلورات، لكن تماثلها الكلى ليس بلّوريًا (كانت بلّورات شِشتمان Shechtman تمثل تماثل الشكل المنتظم ذى العشرين وجهًا، الذى لديه من بين محاور أخرى، محاور خماسية). لقد وجد علم التبلّر نفسه أمام مفارقة، فأشباه بلّورات شِشتمان (Shechtman) لديها كل صفات البلّورات... فيما عدا الدورية!

لقد ولدت البلّورات "غير الدورية".

وفى الشهور القليلة التى أعقبت الاكتشاف، تم إعداد قواعد استنباط واحدة تشمل البلّورات وأشباه البلّورات تعتمد على مفهوم "شبه الدورية".



الشكل (٤)

يمثل تبليط بنروز (Penrose) ذو التماثل الخماسي نموذجًا مثاليًا ثنــائي الأبعاد للبنية الذرية لأشباه البلّورات. ويتكون هذا التبليط من قرميــدتين نموذجيتين، ومعينات ذات زاوية حادة قدرها على التوالي ٧٢° (٥ /π ٢) و٣٦° (١٠ /π٢). ورغم العديد من الأشكال خماسية الزوايا التي يحتويها هذا الشكل، لا توجد أي نقطة يمكن أن تكــون مركــزًا لمحــور دوران خماسي بالمعنى الدقيق. غير أن أشكال بنروز (Penrose) تسمح بتماثــل خماسي حقيقي، وهو بالنسبة للفيزيائي، ليس تماثلاً تقريبيًا أو تماثلاً كائنًا.

إن أشباه البلّورات عند فحصها من خلال مجهر إلكتروني ذي حــدة تمييــز عالية، تبدي انتظامًا مدهشًا يدل، مع أشكال الحيود، على نظام على مسافة طويلــة. إن هذه المواد الصلبة "الأكثر دورية من بين الجوامد غير الدورية"، طبقًــا لتعبيــر لويس ميشيل (Louis Michel)، تخفي حالات تماثلها في فراغات ذات أبعاد أكبر. إن ذلك هو لب شــبه الدوريــة، وهــو مفهــوم توصــل إليــه س. ســكلاندون (C.Esclandon) في عام ١٨٩٩، وطوره ه.بوهر (H.Bohr) عام ١٩٢٥، ثم قــام

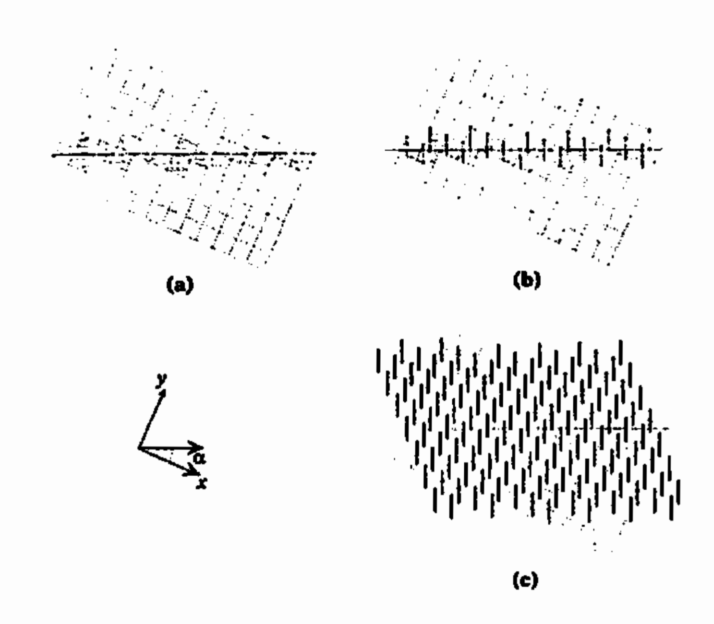
أ.بيسيكوفيك (A.Besicovic) بتعميمه عام ١٩٣٢ في بحثه عن دراسة الدوال المتصلة شبه الدورية.إن الدوال شبه الدورية تتطابق مع قيود (مقاطع) ذات متغيرات d لدوال "دورية" ذات متغيرات N حيث N > d. على سبيل المثال، الدالة الدورية لمتغيرين x وy التي تتخذ شكل: $f(x, y) = \cos(2\pi x) + \cos(2\pi\sqrt{2}y)$، دورتها ١ طبقًا لـ x و $1/\sqrt{2}$ طبقًا لـ y، تكون شبه دورية طبقًا للمقطع القطري x = y، بما إنها تؤدي إلى الدالة ذات المتغير الواحد $F(x) = \cos(2\pi x) + \cos(2\pi\sqrt{x})$ والتي هي ليست دورية نظرًا لانعدام النسبية بين الدورتين.

إن هذه الفكرة البسيطة جدًا الخاصة بالمقطع القطري للدوال الدورية، هي التي طبقت لبناء مجموعات من النقاط موزعة بطريقة شبه دورية. ومن ثم، اقترح جون كونواي (John Conway) الخوارزم (algorithme) المسمى "طريقة الأقفاص" الذي يوصف كما يلي. ترسم في المستوى شبكة مربعة بسيطة، يتم تقاطعها بأي خط مستقيم ميله غير نسبي بالنسبة للاتجاهات الأساسية x وy للشبكة (الشكل رقم ٥). ويتم جمع كل المربعات الأولية التي تتقاطع مع هذا المستقيم، وينتج عن ذلك الحصول على شريط من المربعات على شكل درج حيث تتوزع الدرجات بطريقة منتظمة لكن غير دورية، لأن ميل المستقيم غير نسبي. ويختار لكل مربع مقطوع نقطة تمثله، على سبيل المثال الرأس العليا التي على اليسار، والتي يتم إسقاطها تعامديًا على المستقيم (الشكل رقم ٥ ب). وبالتالي نحصل على متتالية من القطع المستقيمة الطويلة والقصيرة التي تتطابق، تبعًا للاتجاه المختار، مع الإسقاطات على المستقيم للرؤوس التي تحيط بأضلاع المربعات تبعًا لـ x وتبعًا لـ y. إن جسمًا دوريًا للمستوى قد ولد جسمًا آخر شبه دوري ذا بعد واحد، بواسطة مقطع اتجاه غير نسبي لمستقيم.

ترتكز شبه الدورية على عدم نسبية ميل المستقيم. فبمجرد أن يكون الميل نسبيًا، تكون المتتالية دورية. وبالتالي، يتطابق جسم شبه دوري مع استكمال غير

نسبى بين أجسام دورية. بالنسبة لبعد واحد، يمكن أن تتولد منه كمية لا متناهيـــة لا تحصى، فى حين تكون المتتاليات الدورية قابلة للعد والإحصاء. ويمكن تصور كل متتالية شبه دورية مثل النهاية لسلسلة من المتتاليات الدوريـــة ذات دورة متزايـــدة، بنيت انطلاقًا من حزمة من خطوط مستقيمة تتجمع ميولها (النسبية) نحو العدد غير النسبى المميز للمتتالية شبه الدورية النهائية. إن نسبة القطع المستقيمة القصيرة إلى القطع المستقيمة الطويلة تتوقف على ميل المستقيم، ويتطابق التوزيع النسبى بـــين القطع المستقيمة الطويلة والقصيرة، من حيث الإنشاء، مع الخليط الأمثل. إن أشباه البلّورات تمثل بالنسبة للبلّورات ما تمثله الأعداد غير النـــسبية بالنـــسبة للأعـــداد النسبية:إنها تثرى مجموعة الجوامد المرتبة على مسافة طويلة[٣١]، وتتقاســـم مـــع البلّورات جملة خواصها الهندسية، باستثناء الدورية.

(٣١)تثرى فقط، لأن شبه الدورية لا تستوفى كل الحلول المنظمة الممكنة، بل هى أبعد ما تكون عن ذلـــك! توجد العديد جدًا من الخوارزمات المحددة الأخرى ذات تعقدية محدودة التى تولد أجسامًا منظمة تمامًا على مسافة طويلة ولكنها ليست دورية ولا شبه دورية.



شكل (٥)

مبدأ بناء متتالية أحادية الأبعاد شبه دورية لنوعين من القطع المستقيمة.

(ا) يرسم مستقيم له ميل غير نسبى على شبكة مربعة.

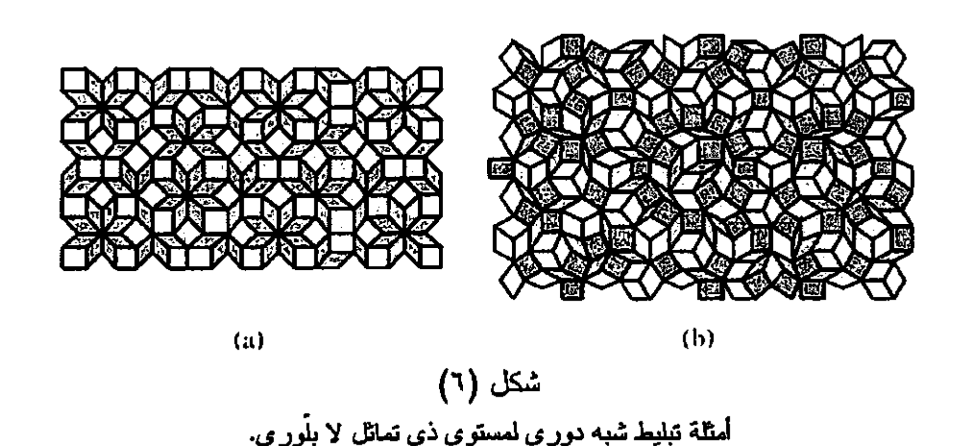
(ب) تجمع الرؤوس العليا التى على اليسار ويجرى إسقاطها عموديًا على المستقيم.

(جـ) إن متتالية النقاط التى تم الحصول عليها بهذه الطريقة تكون شبه دورية، ويمكن أن تنتج مباشرة من تقاطع القطع المستقيمة الرأسية المنقولة فى كل واحد من تقاطعات الشبكة مع المستقيم: إنها طريقة "المقطع" كما تسمى.

حاليًا، تعد الطريقة الأكثر استعمالا للخوارزم المولد لأشباه البلّورات نابعة من تلك التى اقترحها عام ١٩٨٥ بشكل منفرد كل من م.دينو (M.Duneau) وأ.كاتز (A.Katz) فى فرنسا، وف.إلسير (V.Elser) فى الولايات المتحدة، وب.كالوجين (P.Kalugin) ول.ليفيتوف (L.Levitov) وم.كيتايف (M.Kitaev)

فى روسيا. وهى ترتكز على أنه انطلاقًا من شبكة فى حيز ذى بعد N > d، (هنا N=2 و d=1)، يتم وضع عموديًا على مستوى فوقى (hyperplan) ذى بعد d، وموجه بشكل غير نسبى بالنسبة للشبكة، مجموعة من الأحجام المحدودة (قطع مستقيمة فى الشكل ٥جـ) ذات بعد N-d، وجمع تقاطعاتها مع المستوى الفوقى: يتم الحصول على مجموعة من النقاط التى تشكل تبليطًا شبه دورى للمستوى الفوقى.

يؤدى هذا الخوارزم المطبق على فراغات ذات بعد أعلى من ٢، بالنسبة لتبليط المستوى، إلى تركيبات تقبل كل حالات التماثل ذات الرتبة n (دوران $2\pi/n$) الممكنة وليس فقط حالات التماثل ذات الرتبة ٢، ٣، ٤، ٦ المسموح بها طبقًا لقوانين علم التبلّر. وعلى سبيل المثال، يبين الشكل رقم (٦) نوعين من تبليط مستوى لهما تماثل دوران رتبته n=8 (مثمن الأضلاع) وn=12 (شكل ذو ١٢ ضلعًا).



شكل (٦)

أمثلة تبليط شبه دورى لمستوى ذى تماثل لا بلّورى.

تتقاسم كل هذه الأنواع من التبليط خاصية تسمى انتظام: يتكرر كل قسم محدود من التبليط بشكل دورى عدد لا نهائى من المرات فى التبليط. وبالتالى، كل قسم محدود من المتتالية ذات البعد الواحد الخاصة بالشكل رقم (٥جـ)،أيا كان

كبره، يتكرر بانتظام على امتداد المتتالية بطريقة شبه دورية. وتتوقف المسافة المتوسطة للتكرار على القسم المختار وتزيد مع حجم هذا القسم. في البلّورات، تكون هذه المسافة ثابتة، ومستقلة عن القسم المعنى، وتساوى دورة الشبكة. إن إحدى النتائج البارزة لهذه الخاصية هى أن فى كرة نصف قطرها r محدود لشبه بلّورة يكون عدد الأشكال المختلفة محدودًا. وبالتالى يمكن بطريقة شاملة تصنيف كل وسط موضعى للقرميد حول نقطة ما.

تتعلق النظرية الأساسية الثانية بتأثير الانتقال الرأسى لمستقيم القطع. سنتناول هذه المرة متتاليتين تم الحصول عليهما عن طريق مستقيمى قطع مختلفين ومتوازيين. نفترض أن الانتقال الرأسى الذى يحقق المرور من مستقيم إلى الآخر هو نوعى، وتكون المتتاليتان اللتان تم الحصول عليهما بهذه الطريقة غير قابلتين للتراكب. إن نظرية التشاكل الموضعى، أى التماثل فى الشكل موضعيًا، تفترض أن[٣٢] كل قسم محدود لإحدى أشكال التبليط يتواجد فى الآخر، والعكس بالعكس. مع نظرية الانتظام، نرى أن التبليطين يتعذر أساسًا التمييز بينهما... إلا عند ما لا نهاية! لا نستطيع التمييز بينهما بفحص قسم محدود من التبليط، مهما كان كبيرًا. إنهما متماثلان الشكل موضعيًا.

هل يمكن القول إن أشكال بنروز (Penrose) تسمح بتماثل خماسى؟ الإجابة نعم، لكن بمعنى مختلف بعض الشيء عن معنى التراكب الهندسى لجسم على نفسه، فالأمر يتعلق هنا بشبه تماثل، وهو مفهوم نابع من النظريتين السابقتين، انتظام وتشاكل موضعى.

لفهم معنى ذلك، نفحص أولاً أبسط حالات التماثل البلّورى: حالة انتقال الشبكة. لذلك سنتناول المتتالية شبه الدورية للشكل (٥جـ) التى سنقوم بنقلها بالنسبة لنفسها بكمية تساوى المسافة بين أى نقطتين من نقاطها.

---

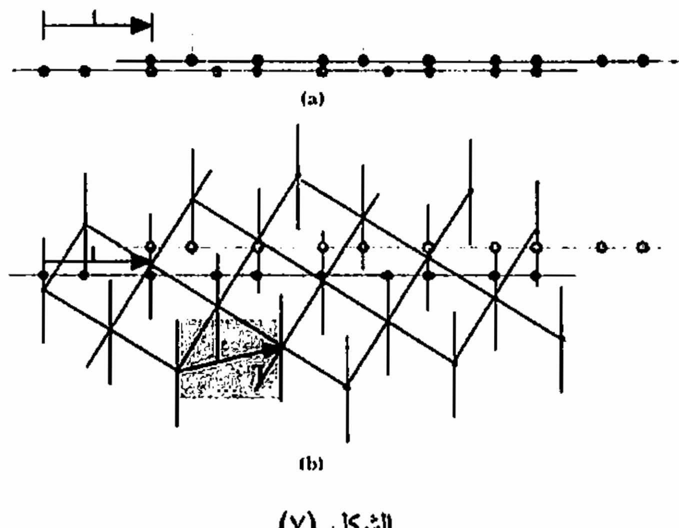
(٣٢)مع مراعاة أن يكون مجموع النقاط الصورة العمودية للتبليط كثيفًا بشكل منتظم وهى الحالة الوحيدة التى نتناولها هنا.

نلاحظ عندئذ (الشكل ٧أ)، أن جزءًا فقط من النقاط يتراكب. وإذا أحصينا العدد n من النقاط المتراكبة فى فسحة حجمها d والعدد الكلى N للنقاط فى هذه الفسحة، نتحقق من أن نسبة التغطية،التى يتم قياسها بالنسبة بين n/N، تنزع نحو نهاية غير صفرية: إن عددًا محدودًا من النقاط يتراكب.

إن تفسير ذلك بسيط: بما أن النقل t هو المسافة بين نقطتين من المتتالية موجودتين، فهو إذن يساوى المكونة الأفقية للمتجه T التى تربط تقاطعات الشبكة المربعة الحاملة لقطع المستقيمات الرأسية التى ولدت النقطتين المعنيتين. يمكن بالتالى الحصول على المتتالية المنقولة بتحريك مستقيم القطع السفلى، الشكل (٧ب)، مسافة تساوى المكونة الرأسية للمتجه T لإعطاء المستقيم العلوى. وتكون المتتاليتان متماثلتا الشكل موضعيًا، بما أنهما يرجعان إلى الأصل نفسه. إن النقاط المشتركة بين المتتالية والمتتالية المنقولة عنها، قد تولدت إذن من القطع المستقيمة الرأسية التى تم قطعها فى آن واحد بواسطة الخطوط المستقيمة الأفقية. ولمعرفة نسبة التغطية، يكفى جعل القطعتين المستقيمتين النموذجيتين للمتجه T، المزاحتين الواحدة بالنسبة للأخرى، تنزلقان (المستطيل الرمادى أسفل الشكل رقم ٧ ب) على امتداد الخط الأفقى لاقتيادهما على الخط الرأسى نفسه: يكون الجزء المشترك بينهما قطعة مستقيمة صغيرة، وعند قسمة طولها على طول القطعة المستقيمة النموذجية نحصل على نسبة التغطية، والتى بالتالى تتغير، طبقًا للنقاط الأصلية المختارة، ما بين صفر وواحد، مع استبعاد الحدود[٣٣]. كلما كانت المكونة الرأسية للمتجه T ضعيفة، كان للمتتالية نقاط مشتركة مع المتتالية المنقولة الخاصة بها. ويكفى لتمثيلهما تطبيق خوارزم القطع، مع اختيار هذه القطعة المستقيمة الصغيرة

(٣٣)يقبل كل متجه للشبكة المربعة مكونًا رأسيًا غير صفرى لأن مستقيم القطع موجه بشكل غير نسبى بالنسبة للشبكة. ويستبعد ذلك نسبة تغطية مساوية بدقة لواحد، كما بالنسبة للبلورات التى تتطابق فى هذا السياق مع اتجاه نسبى. أما فيما يتعلق بنسبة التغطية المساوية لصفر، فإنها مستبعدة افتراضًا بما أن النقطتين المحددتين للنقل هما نقاط من المتتالية وبالتالى تتطابقان مع التقاطعات المتزامنة للقطعتين المستقيمتين النموذجيتين،، ويكون إذن لإسقاطهما على مستقيم رأسى جزء مشترك غير صفرى.

المشتركة كقطعة مستقيمة نموذجية: يكون مجموع النقاط المشتركة متتالية شبه دورية، ومن ثم تمتد التغطية الجزئية بطريقة منتظمة إلى ما لا نهاية(٣٤).



الشكل (٧)

إن إزاحة متتالية شبه دورية بعملية نقل t، بين أى نقطتين من نقاطها، لا يؤدى إلى ثباتية صحيحة رغم أن عددًا غير محدود من النقاط يتراكب. تتولد المتتالية المنقولة بإزاحة مستقيم القطع أسفل عملية النقل T الخاصة بالشبكة ذات البعدين والتى تتطابق مكونتها الأفقية مع عملية النقل الأصلية t.

هل يمكن وصف النقل t بأنه عملية تماثل؟ بما أن تطبيق هذا النقل يكافئ تحريك مستقيم القطع رأسيًا، فلنجرى تحريكًا رأسيًا متناه الصغر. وحيث إن إسقاط تقاطعات الشبكة المربعة على الخط الرأسى هو مجموع مكثف من النقاط، يوجد موضع يتقاطع فيه مستقيم القطع مع قطعة مستقيمة راسمة فى الجوار المباشر لأحد

---

(٣٤) إن هذه الخاصية (نظام على مسافة طويلة) هى التى تكسب طيف حيود المتتالية السمة المنقوطة (رؤوس الحيود).

أطرافه. ويكون تأثير النقل المتناهى الصغر هو استبعاد هذا التقاطع لصالح تقاطع جديد، صادر من القطعة المستقيمة التى يتم إسقاط أحد أطرافها على مستقيم رأسى، فى النقطة نفسها لأحد أطراف القطعة المستقيمة السابقة: و"تقفز" نقطة من المتتالية من موقع إلى موقع آخر مجاور لصيق (طوير phason). ويحدث هذا الموقف الحرج عندما يمر مستقيم القطع بمركز مربع ما، وبالتالى عندما تقبل المتتالية بمركز للتماثل على مسافة متساوية من نقطتى القفزة. ومن ثم يكون الشكل، حيث تختار نقطة اليمين لاستكمال المتتالية، مكافئا للشكل حيث تختار نقطة اليسار: إنهما يستنبطان الواحد من الآخر بالتعاكس حول المركز. إن التحرك الرأسى المحدود يرتكز على تطبيق هذه العملية الأولية عددًا لا محدود من المرات حول عدد لا محدود من مراكز التعاكس المختلفة. هكذا سوف نصمم بعملية شبه تماثل "كل عملية تماثل للمجموع المتكون بواسطة قطع مستقيمة راسمة موزعة على الشبكة المربعة، وهذه العملية تحول المتتالية إلى أخرى متماثلة الشكل معها موضعيًا، مع ترك جزء محدود من النقاط ثابتة".

وبطريقة مماثلة، يوجد ذلك مجددًا بالنسبة للتبليط شبه الدورى الثنائى والثلاثى الأبعاد. وهكذا يوضح الشكل رقم (٨أ) (خارج النص) تراكب تبليط ثمانى الأضلاع على نفسه بعد عملية نقل. ويمكن بالمثل، إجراء دوران للتبليط بمقدار $2\pi/8$ حول أى من نقاطه (انظر الشكل ٨ب خارج النص). يؤدى التراكب إلى عدد غير محدود من النقاط فى حالة تراكب، ويكون التبليطان متماثلى الشكل موضعيًا.

إن المعنى الفيزيائى لشبه التماثل هو التالى: لنتفحص نسختين من التبليط نفسه، وليكن مثلاً ثمانى الأضلاع، ولنعرض أحدهما لدوران $2\pi/8$ حول نقطة ما من التبليط. لنأخذ منه جزءًا نحدد حجمه كما نريد. وبما أن التبليطين متماثلين الشكل موضعيًا، فإن هذا الجزء سيتواجد عددًا لانهائيًا من المرات فى التبليط الآخر: لا نستطيع التمييز بينهما بالفحص الموضعى، فهما موضعيًا غير قابلين للتمييز بينهما. بهذا المعنى، يكون الدوران $2\pi/8$ هو عملية تماثل للتبليط. والشىء

نفسه بالنسبة لكل شكل له حجم محدود فى تبليط ثمانى الأضلاع يتواجد، بـــالتردد نفسه، تبعًا لكل الاتجاهات المكافئة لمثمن الزوايا.

وبالتالى، انتقلنا مع شبه البلّورات من المفهوم التقليدى للتماثل، عملية ثابتيـــة بالتراكب الكلى لجسم، إلى مفهوم أكثر مرونة، نـــوع مـــن النـــسخة "الموضـــعية" للتماثل، حيث تترجم الثابتية بالتراكب على المستوى الموضـــعى لكـــل الأجـــزاء المحدودة للجسم، والتى تتوزع مجددًا تحت فعل عملية التماثل مع احترام تـــرددات الظهور الأصلية. لكن أليس ذلك فى النهاية هو المعنى العميق للتماثل الحيزى فـــى الفيزياء؟ فى الواقع، إن ما يهم ليس ثابتية طريقة توزيع الذرات فى مجملها، لكـــن الثابتية، الأكثر دقة، الخاصة بالطريقة التى تترتب بها "الذرات بالنـــسبة لبعـــضها البعض". إن عمليات شبه التماثل تحترم الثابتية الثانية هذه عند كل مقياس محدود. ومن هذه الناحية، فإن عمليات شبه التماثل، بالنسبة للفيزيائى، مكافئة تمامًا لحالات التماثل البلّورى. إن أشكال تبليط بنروز (Penrose) تقبل تمامًا بتماثـــل خماســـى الزوايا، بمعنى أن خواصها الفيزيائية واحدة فى كل الاتجاهات المكافئـــة لمخمـــس الزوايا المنتظم. ومن ثم، مع أشباه البلّورات لم يعد التماثـــل الهندســـى، بالنـــسبة للفيزيائى، مرادفًا للتكافؤ الفيزيائى. إن التكافؤ الفيزيائى أكثر تسامحًا مـــن التماثـــل الهندسى: فليس من الضرورى أن تكون البنية الذرية ثابتة هندسيًا لكى يكون هناك تماثل، تسمى عملية ما بعملية تماثل إذا نتج عنها جسم صـــورة لا يمكـــن تمييـــزه موضعيًا، حيث كان، عن الجسم الأصلى.

الميوعة الفائقة[٣٥]

بقلم: سيباستيان باليبار

Sébastien BALIBAR

ترجمة: لبنى الريدى

توجد سوائل أكثر ترتيبا من سوائل أخرى، وتسمى "فائقة الميوعة" لأن لزوجتها صفر. ومن ثم فإن الميوعة الفائقة خاصية كمية، ترى بالعين المجردة وهى خاصية مذهلة. إن الهليوم السائل مثلاً، عندما يصبح فائق الميوعة، يكف عن الغليان، وينبثق على شكل عين أو نبع عند تسخينه، ويسيل تلقائيًا خارج الأوعية التى نحاول حبسه داخلها، كما يشكل دوامات كلها متماثلة، إلخ. يكاد يكتمل فهمنا المفصل للميوعة الفائقة فى عام ٢٠٠٠. أخيرًا إذا أدركنا أن التوصيلية الفائقة لبعض الفلزات ترجع إلى الميوعة الفائقة لشحناتها الكهربية، وأن قلب النجوم النيترونية فائق الميوعة دون أدنى شك، وأن بعض الأبخرة القلوية يمكن أن تكون فائقة الميوعة، كما اكتشف عام ١٩٩٩، وتؤدى إلى صنع ليزر ذرى، لتحققنا من أن الميوعة الفائقة أكثر بكثير من أن تكون مجرد طرفة معملية. لقد شكل اكتشافها فى القرن العشرين تقدمًا علميًا كبيرًا، وكان منح عددًا كبيرًا جدًا من جوائز نوبل لهذه الظاهرة بمثابة اعتراف بذلك، وفى القرن الواحد والعشرين لم تعرف بعد كل نتائجها.

---

(٣٥) نص المحاضرة رقم ٢٢٣ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٠ أغسطس ٢٠٠٠.

اكتشاف تاريخى

إن تاريخ الميوعة الفائقة[٣٦] يبدأ عام ١٩٢٧، فى مدينة ليدن (Leiden) فى هولندا، عندما اكتشف و.ه.كيسوم (W.H.Keesom) وفريقه، بدهشة كما أتصور، أن الهليوم السائل يوجد فى شكلين مختلفين تمامًا، رغم أنه يتكون من ذرات كروية صغيرة، دون أية خواص خاصة، لا كيمائية ولا مغناطيسية. يوجد بين شكلى الهليوم السائل، اللذين يطلق عليهما "هليوم I " و"هليوم II "، تغيير حقيقى للحالة الفيزيائية التى تشير إليه قمة حرارة نوعية على شكل الحرف اليونانى لامبدا (λ)، ومنه اسم "نقطة لامبدا" الذى يطلق على درجة حرارة التحول ($T_\lambda = 2,17$ Kelvin) أى حوالى -٢٧١ درجة مئوية). بعد ذلك وخلال العقد التالى، تم إدراك أن عند درجة حرارة أقل من نقطة لامبدا لا يعد الهليوم السائل هذا السائل التقليدى الخفيف: تصبح قدرته على التوصيل الحرارى كبيرة بشكل ملحوظ (و. ه. كيسوم (W.H.Keesom) وأخته أ. ب. كيسوم (A.P.Kessom)، ليدن (Leiden)، ١٩٣٦. ج. ف. ألين (J.F. Allen) ور. بيرلس (R.Peierls) وم. ز. أودين (M.Z.Uddin)، كمبريدج، ١٩٣٧) وتختفى لزوجته (ج. أ. ولهيلم (J.O.Wilhelm) وأ. د. مسينير (A.D.Misener) وأ. ر. كلارك (A.R.Clark) تحت إدارة إ. ف. بورتون (E.F.Burton)، تورنتو، ١٩٣٥، وج. ف. ألين (J.F.Allen) وأ. د. ميسينير (A.D.Misener)، كمبريدج، ١٩٣٨، وب. كابتزا

---

(٣٦)لتناول أولى لهذا التاريخ، يمكن الرجوع إلى مقال "الميوعة الفائقة" الذى كتبته فى Encyclopedia Universalis وخاصة المراجع الموجودة فيه، العدد ١٤١ (١٩٣٨) من مجلة Nature بشكل خاص. إن كتابى:

J. Wilks, The properties of liquid and solid helium, Clarendon Press, oxford 1970, Introduction to liquid helium, Clarendon Press, Oxford 1987

يظلان مرجعين لا يمكن تجاوزهما بالنسبة لفيزياء الهليوم، وكذلك الأمر بالنسبة لكتابى:

F.London (SuperfluidsI and II, Wiley, New York, 1950 and 1954).

ويمكن أيضا مراجعة K.Gavroglu, Fritz London: a scientific biography, Cambridge University Press, Cambridge 1995, et A.Griffin,"A brief history of our understanding of BEC: from Bose to Beliaev", Comptes rendus de l, "Enrico Fermi Summer School", CXL, Varenna, Italy, (IOS Amesterdam, 1999).

(P.Kapitza)، موسكو، ١٩٣٨). وحصل Kapitza على جائزة نوبل عـــام ١٩٧٨ قبل أن يموت بقليل، وهو مخترع كلمة "فائق الميوعة" لوصف الهليوم II.

إذا قمنا بالضخ على هليوم سائل، في أداة معزولة حراريًا لحفــظ الحــرارة عند درجات منخفضة بواسطة غاز سائل، فإنه يغلي أثناء تبريده، مثــل أي ســائل عادي. لكن بمجرد أن نصل إلى أدنى من ٢,١٧ كلفن يتوقف الغليان. في الواقــع، تفرض التوصيلية الحرارية الكبيرة فجأة تجانسًا للحرارة لافتًا للنظر في كل السائل وتستبعد كل النقاط الساخنة القابلة لأن تولد فقاعات، ولا يتبقى على السطح ســوى التبخر. إذن، إن أول انطباع بصري يعطيه السائل فائق الميوعة الأكثر انتشارًا هو أنه سائل ساكن جدًا. إن انطباع النظام هذا ليس خاطئًا، لكنه مــع ذلــك لا يــسهل فهمه.

ومن ناحية أخرى، بما أن لزوجة الهليوم الفائق الميوعة صفر، فهــو قابــل لأن يسيل سريعًا عبر مسام أو قنوات شعرية أو شقوق متناهية الصغر، بل وحتــى ذات أبعاد ذرية، بينما في الحالة العادية يكون ذلك مستحيلاً عمليًا. ومن ثم يمثــل تسرب السائل فائق الميوعة كابوسًا للفيزيائيين الذين يعملون في هذا المجال. عنــد مراجعة ملحوظات كاميرلنف أونــيس (Kammerlingh Onnes) (ليــدن Leiden ١٩٢٢) أوضح ب. ف. رولين (B.v.Rollin) عام ١٩٣٦ نتيجــة شــهيرة لهــذا الغياب للزوجة، ففي الحقيقة أن الهليوم الفائق الميوعة قادر على الارتفــاع علــى امتداد حواف الأواني التي تحتويه لكي يصب في الخارج. تكون العديد من السوائل مثل هذا الغشاء الرقيق عند ملامسة الجانب الداخلي. إنها قضية تبليل تقليدية، لكــن بما أن سمك هذا الغشاء لا يتجاوز عدة عشرات من النانومتر[٣٧]، فإنه لا يــستطيع أن يسيل بسرعة تستحق الذكر إلا إذا كان السائل مائعًا للغاية. وسنرى أن الهليــوم الفائق الميوعة يملك أيضًا خواص أخرى مدهشة.

---

(٣٧) وحدة قياس تساوي واحد على مليار من المتر. (المترجمة)

عند قراءة المجلد ١٤١ لمجلة نيتشر (Nature) (١٩٣٨)، ندرك شدة المنافسة التى حركت مضلع تورنتو- كمبريدج - موسكو - باريس- أوكسفورد -ليدن - خاركوف خلال شتاء ١٩٣٧-١٩٣٨. فى تلك الفترة، لم تكن هناك تجربة دقيقة بما يكفى لتقديم دلالة على السمة الكمية للميوعة الفائقة. إلا أنه منذ مارس - أبريل ١٩٣٨، جاء لفريتز لندن (Fritz London)حدس بهذا الشأن. طرأت لفريتز (Fritz) فكرة أن النقطة لامبدا لابد أنها تنتج عن "تكثيف بوز - أينشتاين (Bose-Einstein)" لذرات الهليوم مشيرًا على الفور إلى الصعوبات التى تثيرها فكرته (هذا "التكثيف" هو تنبؤ يتعلق بالغازات بينما الهليوم المعنى سائل). وكان فريتز لندن (Fritz London) قد هرب من ألمانيا النازية، وعمل مؤقتًا فى باريس فى معهد هنرى بوانكاريه (Henri Poincaré) قبل أن يستقر فى الولايات المتحدة. من المعروف حاليًا أن حدسه كان جيدًا، لكننا بالكاد نبدأ فى فهم كيفية حل الصعوبة المذكورة، ويرجع الفضل فى ذلك بشكل خاص إلى اكتشاف الموائع الفائقة الغازية. وفى الفترة نفسها قام مباشرة عالم آخر، هو لازلو تيزا (Laszlo Tisza)، الذى أقام مؤقتا فى باريس قبل أن يستقر فى الولايات المتحدة، بتطوير نظرية تعنى بوصف ظاهرة الميوعة الفائقة (الـ"نموذج ذو مائعين") انطلاقا من أفكار لندن (London). وكان تيزا (Tisza) هو أول من تنبأ بأن الحرارة لا تسرى فى سائل فائق الميوعة بالانتشار كما فى مائع عادى، لكن فى شكل موجات. إن هذه الموجات التى سميت فيما بعد "الصوت الثانى"، سيقوم بيسكوف (Peshkov) باكتشافها فى موسكو عام ١٩٤٦. وسمح له نموذجه ذو المائعين أيضًا بتفسير أن "تأثير الينبوع" الذى اكتشفه ج. ف. ألين (J.F.Allen) وهـ. جونس (H.Jones) فى فبراير ١٩٣٨،هو نتيجة ضغط ارتشاحى. لقد تم فيما بعد تطوير أفكار لندن (London) وتيزا (Tisza) بشكل كبير.

إن المنظر الكبير ل. د. لاندو (L.D.Landau) هو الذى حصل فى الواقع على جائزة نوبل عن نظرية الميوعة الفائقة التى نشرها عام ١٩٤١، بعد أن أنقذه كابيتزا (Kapitza)[٣٨] من السجون الستالينية. والغريب فى الأمر أن هذه النظرية

---

(٣٨) L.D.Landau, J.Phys USSR 5, 71 (1941) et 11, 91 (1947), Collected Papers p. 301 et 466, ed. by D. Ter Haar (Pergamon Press, 1965).

لم تشر قط إلى تكثيف بوز – أينشتاين (Bose-Einstein) رغم أن الأمــر يتعلــق بنموذج ذى مائعين شبيه جدًّا بنموذج تيزا (Tisza). إن الفــضل الكبيــر للانــدو (Landau) أنه أولاً وصف رد فعل الهليوم السائل لإثارة خارجية بموجــب صــيغ جماعية. إن هذه الصيغ الجماعية هى أساسًا موجات صوتية مكممة، الــ"فونــون"، مع أن لاندو (Landau) نشر شروحًا مطولة عن صيغ جماعية أخرى، كان يعتقــد أنها دوامات أولية (rotons). ويذكر بشكل خاص أنه استنتج منهــا بعــد ذلــك أن الميوعة الفائقة لا يمكن أن توجد عند سرعة أعلى من حد ســرعة معــين أســماه "السرعة الحرجة". فى الواقع، لا يسيل المائع الفائق بدون لزوجــة ظــاهرة إلا إذا كانت سرعته أقل من حد معين.

أما فيما يتعلق بحساب السرعة الحرجة، التى ابتداء من عندها نلاحظ ظهور تبديدًا للطاقة فى جريان مائع فائق، فإنها مشكلة صعبة لا تزال حاليًا محل بحــث. ولا يتم رصد سرعة لاندو (Landau) الحرجة إلا فى حالات استثنائية جدًّا حيــث يكون الجريان مجهريًا. إنها حالة التجارب الخاصة بحركية الأيونات التى نجح فى إجرائها بيتر مكلنتوك (Peter McClintock) وفريقه، فى لانكــستر (Lancaster) فى بداية الثمانينيات[٣٩] من القرن العشرين، فى الهليوم المضغوط والفائق الميوعة والمتناهى النقاء. إنها أيضًا حالة التجارب الحديثة جدًّا التى أجرتها المجموعة التى يقودها ولفجانج كترل (Wolfgang Ketterle) فى الــ MIT، حيث يتم تحريــك حزمة ضوئية فى بخار صوديوم تم تكثيفه بشكل مناسب.[٤٠] بشكل عــام، عنــدما يتعلق الأمر مثلاً بجريان الهليوم السائل من خلال ثقب، تكون الــسرعة الحرجــة المرصودة أقل بكثير. لقد أوضحت أعمال أو. أفينيل (O.Avenel) وأى. فــاروكو (E.Varoquaux "Saclay, 1985") أن جريانًا فائق الميوعة يفقد طاقة حركية فى

---

(٣٩) T.Ellis and P.V.E.McClintock, Phil. Trans. R. Soc. A315, 259 (1985).

(٤٠) إن عرض W.Ketterle "Bose-Einstein condensation in dilute atomic gases: atomic physics meets condensed matter physics" Physica B 280, 11 (2000)، واضح بشكل خاص ويحتــوى كل المراجع الضرورية.

قفزات مكممة تتطابق مع مرور دوامات، هي أيضًا مكممـــة، خـــلال الثقـــب.[41] سنعود إلى هذه الدوامات بعد أن نتناول بالبحث قضية التكثيف الخاصـــة ببـــوز – أينشتاين (Bose-Einstein) بطريقة أكثر دقة.

تكثيف بوز – أينشتاين (Bose – Einstein)

من جديد يفرض قدر قليل من التاريخ نفسه لأن أسماء كبيرة جـــدًا تتـــدخل فيه، فى فترة شهدت مولد الفيزياء الكمية. ففى عام ١٩٢٤، نشر ســـاتييندرا نـــاث بوز (Satyendra Nath Bose)، وهو طالب بنجالى شاب، مقـــالاً عـــن الفيزيـــاء الإحصائية للفوتونات (كمات الضوء). عند رؤيته لهذا المقال، قام ألبيـــر أينـــشتاين بتعميم بحث بوز (Bose) على غاز ذى جسيمات كبيرة الكتلة ومتماثلة. وكان مقال دو بروجلى (De Broglie) عن الازدواجية "موجة – جـــسيم"، أى عـــن موجـــات المادة، قد نشر فقط عام ١٩٢٣، وكان مقال أينشتاين عن تكثيف بوز (Bose) يمثل أول تطبيق لمبدأ دو بروجلى (De Broglie). حتى أن البعض يعتقد أن شرودنجر (Schrödinger) اكتشف بحث دو بروجلـــى (De Broglie) عنـــدما قـــرأ مقـــال أينشتاين ثم اقترح معادلته الشهيرة.[42]

كان أينشتاين إذن يتوقع أن كل الجسيمات عند درجة حرارة أقل من درجـــة حرارة حرجة معينة والتى تتوقف على كثافة الغاز، يجب أن تبدأ فى "التكثيف" أى فى احتلال معًا الحالة الكمية الأساسية نفسها. وقبل تحديد هذا المفهوم الدقيق، يجب ملاحظة أن أينشتاين المتشكك بشأن نتائجه ذاتها، كتب لإهرينفـــست (Ehrenfest) "أن النظرية جميلة، لكن هل هناك أيضًا بعض الحقيقة فيها؟" فى أعقـــاب فرضـــية أوهلنباخ (Uhlenbeck)، بينما لم يكن مفهومًا بعد أن المادة يمكن أن تغير حالتهـــا بشكل آخر غير الشكل المتقطع (لقد قام لاندو Landau) بحل هذه المشكلة بـــشكل

---

(٤١) O.Avenel and E.Varoquaux, Phys. Rev.Lett. 55, 2704 (1985).

(٤٢) A.Griffin, "A brief history of our understanding of BEC: from Bose to Beliaev", Comptes rendus de l' "Enrico Fermi Summer School", CXI., Varenna, Italy, (IOS Amesterdam,1999).

كبير)، اكتسب تكثيف بوز - أينشتاين (Bose-Einstein) على ما يبدو سمعة أنه بشكل خاص علم مرض نظرى ووجوده خيالى تمامًا.

ما هو الأمر إذن؟ تقرن الميكانيكا الكمية موجة لكل جسيم، وتصف هذه الموجة بـ"دالة موجية"، وهى حل معادلة شرودنجر (Schrödinger). وكما يستطيع وتر كمان أن يهتز طبقًا لأساليب مختلفة ويصدر أصواتًا ذات ارتفاع مختلف، فإن جسيمًا كميًا فى صندوق أو إلكترونا داخل ذرة يستطيع أن يتواجد فى حالات كمية مختلفة تتطابق مع دوال موجية مختلفة وطاقات مختلفة أيضا. وكان أينشتاين يتوقع أن الموجات الممثلة لكل جسيم تتراكم فى الشكل الأساسى لأدنى طاقة، مكونة بذلك موجة عيانية، أى ترى بالعين المجردة، تمثل الـ"متكثف"، حيث أصبح جزء كبير من مجموع الذرات متعذرًا تمييزه عن بعضه البعض. إذن، التكثيف المعنى ليس تغيرًا فى الكثافة، كما يحدث عندما يتكثف غاز فى شكل سائل أو مادة جامدة. إن التكثيف هنا يمثل انتقالاً من السلوك الفردى غير المنظم للذرات إلى سلوك أكثر تنظيمًا لأنه جماعى.

لنتوقف هنا عند هذا الانتقال "نظام- فوضى". إن فيزياء القرن العشرين أوضحت أن كل تغير فى حالة المادة ينتج عن مثل هذا الانتقال. غير أنه من الممكن أن يتعلق الأمر بأنواع مختلفة من النظام. بالتالى، عندما يتبلّر سائل، فإن مكوناته (ذرات أو جزيئات) تنتظم فى الحيز العادى: تترتب مواضع مكوناته بطريقة منتظمة وهو ما يعطى البلّورات أشكالها المتماثلة. وبالمثل عندما تتحول مادة بارامغناطيسية لتصبح ذات مغناطيسية حديدية فذلك لأن كل المغناطيسات المجهرية تتوجه فى الاتجاه نفسه. أما فى حالة الانتقال إلى السائل فائق الميوعة فإن الأمر لا يتعلق بنظام فى الحيز العادى للأوضاع والمواقع، لكن فى حيز السرعات: فى وجود إثارة خارجية، تتبنى الذرات حالة سكون جماعى أو حالة حركة جماعية منظمة. لقد ذكر أحيانًا صورة جماهير تسير بخطوة منتظمة، لكن يبدو لى هذا التشبيه غير مناسب لأن الذرات لا تجمد مواقعها المتبادلة، إنها تصبح

غير قابلة للتمييز بينها وتحتل الحيز بشكل جماعى، وتكـون حركتهـا المحتملـة جماعية بدلاً من أن تكون فردية.

ومن ناحية أخرى يوجد معيار بسيط لتقدير الحرارة التى يحدث عندها هـذا التكثيف. ألا وهو مقارنة "الطول الموجى لدو بروجلـى (De Broglie)" الخـاص بالجسيمات المكونة للغاز بالمسافة المتوسطة بين هذه الجسيمات. يتوقف هذا الطول الموجى على درجة الحرارة T، فهو يزيد عند انخفاض T، ويميز تمـدد حزمـة الموجة المقترنة بالجسيم. وإذا كان هذا المدى مماثلاً للمسافة بين الجسيمات، فعندئذ تتراكب الموجات، وتفقد الجسيمات طابعها الفردى، والغاز الذى "انحل" أى أصـبح كميًا، يتكثف بالمعنى الخاص ببوز – أينشتاين (Bose-Einstein).

إذن هل كل الغازات، عند درجة حرارة منخفضة بما فيه الكفاية (أو كثافـة عالية) تتكثف بهذه الطريقة؟ مطلقًا. إن المادة لديها خيار بين أنواع مختلفـة مـن النظام. عندما نبرد غازا أو نضغطه فإنه بشكل عام يتبلّر. إن الهليوم استثناء لأنـه عند ضغط معتدل يظل مائعًا حتى عند درجة حرارة صفر، ويرجع ذلك إلى حقيقة أن ذراته خفيفة جدًا، ومن بين كل العناصر فإن التجاذب بين هـذه الـذرات هـو الأدنى. فضلاً عن ذلك، هناك نوعان متميزان تمامًا من الجسيمات الكمية، وهو ما لاحظه ديراك (Dirac) عام ١٩٢٧. إن جسيمات النوع الأول، المسماة "بـوزون"، تستطيع أن تتجمع كلها فعليًا فى الحالة نفسها. وعلى النقيض، نجـد أن جـسيمات النوع الثانى، المسماة "فرميون"، لا تستطيع مهما حدث أن تحتـل الحالـة نفـسها بموجب "مبدأ الاستبعاد لـ Pauli". إن الفوتونات هى بوزونات، لكن الإلكترونات والبروتونات والنترونات فهى فرميونات. إن الفرق بين هذين النوعين من الـسلوك الإحصائى هو مسألة تماثل دقيقة. أما بالنسبة لذرات الهليوم، فالأمر كلـه يتوقـف على النظير المعنى. فى الثلاثينيات من القرن العشرين، كان الهليوم٤، المتكون من ٢ بروتون و٢ نترون و٢ إلكترون، هو الوحيد المتاح بكميات كافية. مـع رقمـه الزوجى من الفرميونات، يكون الهليوم٤ بوزونًا ويمكنه بالفعـل أن يتكثـف. فـى

المقابل، الهليوم٣، النظير الخفيف الذى لا يحتوى إلا على نترون واحد، يكون فرميونًا، وسيثبت التاريخ أن ذلك يمثل اختلافًا كبيرًا.

الميوعة الفائقة والتوصيلية الفائقة
وتكثيف بوز – أينشتاين (Bose – Einstein)

ما العلاقة بين الميوعة الفائقة وتكثيف بوز – أينشتاين (Bose-Einstein)؟ كان لندن (London) قد لاحظ أساسًا شيئين. أولاً بحساب درجة الحرارة التى عندها سيقوم غاز مثالى له كثافة الهليوم السائل نفسها بهذا التكثيف، وجد أنها ٣,١ كلفن، وهى قيمة قريبة من الـ ٢,١٧ كلفن التى تم رصدها. ثم أن التغير فى درجة حرارة الحرارة النوعية للهليوم السائل، يمر بحد أقصى شبيهًا جدًا بالحد الأقصى الذى تنبأت به أيضًا نظرية أينشتاين الخاصة بدرجة حرارة التحول. وبالرجوع بالزمن إلى الوراء، يبدو لى أن المقارنة بين الهليوم٤ والهليوم٣ تقدم حجة أقوى بكثير لصالح تأثير إحصائى كمى.

على الأرض، يكون الهليوم٤ ناتجًا مستقرًا للـ"نشاط الإشعاعى ألفا" الطبيعى. إن الهليوم٤ يتراكم بكميات كبيرة فى آبار البترول ويستخرج منها بسهولة (كما إنه موجود فى الغلاف الجوى، بالطبع). إن الهليوم٣ هو أيضًا ناتج مستقر لتفاعل نووى، لكن يتعلق الأمر هذه المرة بتفكك التريتيوم، وهو النظير الثقيل للهيدروجين. لم يتمكن الباحثون من الحصول على كميات كافية من الهليوم٣ إلا بعد الحرب العالمية الثانية، عندما عالجت الصناعة العسكرية كميات كافية من التريتيوم من أجل قنابلها الهيدروجينية. وأيًا كانت الإسقاطات السلمية جدًا لصناعة السلاح، فلقد تم فى الخمسينيات من القرن العشرين إثبات أن الهليوم٣ يبدى بعض نقاط التشابه مع الهليوم٤، لكنه يظهر أيضًا اختلافات كبيرة معه. يتحول الهليوم٣ والهليوم٤ إلى سائل عند درجات حرارة متشابهة (بضع درجات حرارة مطلقة)، ويتبلوران أيضًا عند ضغوط متشابهة (حوالى ثلاثين جوى). لكن ما بين واحد

كلفن و٠,٠٠٥ كلفن تختفى لزوجة الهليوم٤، فى حين تزيد لزوجة الهليوم٣ بشكل كبير! لقد استقبل لندن (London) وتيزا (Tisza) هذه النتائج بارتياح كما يمكن تخيل ذلك بسهولة. فى الواقع، يعمل اختلاف لسلوك الإحصائى بين هذين النظيرين على أن ينفصلا تلقائيًا، مثل الزيت والماء، تحت درجة حرارة كسر من الكلفن، وهى خاصية تعتمد عليها كل تكنولوجيا المبردات الحديثة المعتمدة على "الإذابة"، أى كل فيزياء الحرارة المتخفضة ما بين ٠,٠٠٢ كلفن وواحد كلفن.

رغم كل شىء، اكتشف د. م. لى (D.M.Lee) ود. د. أوشيروف (D.D.Osheroff) ور. س. ريتشاردسون (R.C.Richardson) فى كورنيل (الولايات المتحدة) فى عام ١٩٧١ أن الهليوم٣ يصبح هو أيضًا فائق الميوعة، عند درجة حرارة ألف مرة أقل من الهليوم٤، عند حوالى ٢ميللى كلفن. كيف يمكن ذلك؟ فى الواقع، لقد أدخل كابيتزا (Kapitza) كلمة "فائق الميوعة" بالمماثلة مع كلمة "فائق التوصيلية" دون أن يدرك إلى أى مدى الظاهرتين متماثلتين. من المعروف حاليًا أن التوصيلية الفائقة ليست سوى الميوعة الفائقة لمائع مشحون.[٤٣] وقد اكتشفت فى عام ١٩١١ فى ليدن بواسطة هـ. كامرلنج أونيس (H.Kammerlingh Onnes) الذى قاس التوصيلية الكهربية للزئبق. لكن كان يتعين انتظار عام ١٩٥٧ لكى يفهم ج. باردين (J.Bardeen) ول. ن. كوبر (L.N.Cooper) وج.- ر. شريفر (J.-R.Schrieffer) آليات هذه الظاهرة. إذا لم تتجمع الإلكترونات فى شكل أزواج ("أزواج كوبر") فإنها تتحول إلى بوزونات وتكون قابلة لأن تتكثف. إن الفلز الذى أصبح فائق التوصيل تختفى مقاومته الكهربية لأن شحناته الكهربية المتحركة تصبح فائقة الميوعة. وخلال القرن العشرين، اكتشف تدريجيًا أن ذلك يتعلق بعدد كبير من الفلزات غير الزئبق، مثل الرصاص والقصدير والألومنيوم والزنك... وسبائك النيوبيوم التى بدونها ما كان

---

(٤٣) A.J.Legget, "Superfluidity", Rev.Mod.Phys. 71, S318 (1999) et J.-R.Schrieffer and M.Tinkham "Superconductivity", Rev.Mod.Phys. 71,S313 (1999).

للتصوير الطبى الحديث أن يكون ما هو عليه حاليا، ومركبات عضوية، كذلك العديد من أكاسيد النحاس أو الايتريوم أو اللانثان أو البزموت، التى اكتشفت انطلاقًا من أعمال ج. بدنورز (G.Bednorz) وك. أ. مولر (K.A.Muller) فى زيورخ عام ١٩٨٦ والتى تمثل عائلة "الموصلات الفائقة عند درجة حرارة حرجة عالية" لأنها تبدى هذه الخاصية الرائعة عند حدود مائة كلفن تقريبًا. لقد تم تتويج كل الباحثين المذكورين فى هذه الفقرة بجائزة نوبل، وسوف نقابل بعض الباحثين الآخرين الذين أترك للقارئ الاهتمام بالتعرف عليهم.

فيما يتعلق إذن بالهليوم٣، اقترحت أعمال بحثية فرنسية – أمريكية مختلفة (ب. و. أندرسون (P.W.Anderson) وب. موريل (P.Morel) فى عام ١٩٦١ ثم ر. باليان (R.Balian) ور. ويرثامير (R.Werthamer) فى عام ١٩٦٣) آلية اقتران بين ذرات يمكن أن تقود إلى أنواع مختلفة من الميوعة الفائقة. وهو ما تم اكتشافه فى كورنل، وسمح بعد ذلك بدراسة تنويعة من الخواص الفيزيائية الثرية بشكل مذهل طالما أن الهليوم٣ يمثل فى منطقة الميللى كلفن ثلاث حالات مختلفة فائقة الميوعة مع تركيبات مثل البلّورات السائلة وموجات لف ذاتى مثل المواد ذات المغناطيسية الحديدية.

إذن لا يوجد أدنى شك فى أن الميوعة الفائقة مرتبطة بالخواص الإحصائية الكمية للمادة. إن المشكلة التى يصعب حلها هى مشكلة إثبات كمى ودقيق لهذا الارتباط. فى عام ١٩٤٧، تم تجاوز مرحلة مهمة على يد ن. ن. بوجوليوبوف (N.N.Bogoliubov). لقد تناول، فى الواقع، حالة وسيطة بين حالة بوز – أينشتاين – لندن – تيزا (Bose-Einstein-London-Tisza)، بمعنى حالة الغاز المثالى بدون تفاعلات بين الذرات، وحالة السائل حيث تكون هذه التفاعلات قوية. وأثبت أنه فى غاز بوز (Bose)، مع تفاعلات تنافر ضعيفة بين الذرات، يمكن أن يوجد تكثيف بوز – أينشتاين (Bose-Einstein) معمم، وأن الإثارات الفردية تختفى لصالح الأشكال الجماعية التى تنتشر بسرعة الصوت. فى مثل هذا الغاز، وعند درجة حرارة منخفضة بما يكفى، كان المتوقع إذن العثور على تكثيف فى

حالة ميوعة فائقة. لقد استغرق الاعتراف بهذا العمل وقتًا طويلاً. كان لاندو (Landau) بشكل خاص يصر على تجاهل الارتباط بين الميوعة الفائقة وتكثيف بوز – أينشتاين (Bose-Einstein)، أما لندن (London) فلم يسمع به أبدا على ما يبدو. فى عام ١٩٥٦، قام بنروز (Penrose) وأونساجير (Onsager) بتعميم مفهوم تكثيف بوز – أينشتاين (Bose-Einstein) بشكل نهائى، مثبتين أن نسبة الذرات المكونة للمتكثف فى الهليوم السائل لا تتجاوز حوالى ٨٪، حتى عند درجة حرارة منخفضة جدًا، وذلك بسبب التفاعلات. ولقد قامت تجارب صعبة جدًا لانتشار النترونات بالتحقق من هذا الرقم. غير أن مطاردة حقيقية للمائع الفائق الغازى كانت قد بدأت. فى مثل هذا الغاز الفائق الميوعة، سيكون كل شيء قابلاً للحساب، وللتحقق من صحته بدقة.

الغازات فائقة الميوعة

بما أن الطول الموجى لدو بروجلى (De Broglie) يزيد عندما تقل كتلة الجسيم، وبما أن تبريد المادة لحدود الصفر المطلق ليس بالأمر السهل، فكرنا طويلاً أن أفضل مرشح هو الهيدروجين، العنصر الأول فى التصنيف الدورى. يمكن فصل جزيئات الهيدروجين H_2 بواسطة تفريغ كهربى، ثم تثبيت ذرات الهيدروجين بواسطة مجال مغناطيسى، واصطيادها فى منطقة من الحيز تتطابق مع الحد الأدنى من هذا المجال، ثم تبريد هذه الذرات إلى ٥٠ ميكروكلفن بتبخيرها بطريقة انتقائية خارج هذا الفخ. يبقى إذن مراقبة المليار ذرة التى بقيت فى هذا الفخ ورصد تكثيفها طبقًا لتكثيف بوز (Bose). إن تجربة بهذه الصعوبة لم تنجح، حتى يومنا هذا، إلا بواسطة فريق واحد فى العالم، فريق د. كلبنر (D.Kleppner) وت.جريتاك (T.Greytak) فى MIT عام ١٩٨٨.[٤٤] إن الميوعة الفائقة لهذا الهيدروجين الذرى المتكثف لم يتم إثباتها بعد.

---

(٤٤) W.Ketterle. op.cit.

لكن أثناء ذلك، اتضح أن الهيدروجين أقل صلاحية كمرشح من القلويات المختلفة. فى الواقع، نجح فريق إريك كورنيل (Eric Cornell) وكارل فايمن (Carl Wieman) فى Boulder، عام ١٩٩٥، فى استخدام "التبريد بواسطة الليزر" لكى يبطئ بشكل كبير بخار روبيديوم خارجًا من فرن، ومحاصرة ذراته فى فخ مغناطيسي، وتبريد هذه الذرات أكثر بالتبخير، وجعل تكثيف بوز - أينشتاين (Bose-Einstein) الخاص بها عند حدود الميكروكلفن[٤٥] مرئيًا. كما نجح، وبشكل متزامن، فريق وولفجانج كيتريل (Wolfgang Ketterle) فى الـMIT فى إجراء تجربة مماثلة مستخدمًا الصوديوم، كما أجرى ر. ب. هوليت (R.B.Hulet) فى Rice تجربة ناجحة مماثلة مستخدمًا الليثيوم.[٤٦] لقد حصلت هذه الفرق المختلفة على صور لسحابة الإلكترونات باستخدام الضوء المرئى وهو لحسن الحظ أسهل من حالة الهيدروجين التى تتطلب استخدام الأشعة فوق البنفسجية. ويمكن تخيل هذا الفخ مثل قدح تهتز فيه الذرات مثل الكريات. وبما أن حال الذبذبة الكمية الأساسية هو ذو الطاقة الأدنى، فإنه أيضًا الحال الذى يكون فيه احتمال وجود الذرات فى قاع القدح هو الأكبر. وعندما يحدث تكثيف بوز - أينشتاين (Bose-Einstein)، نرى إذن الذرات تتجمع فى قاع الفخ بينما تستمر الذرات التى لم تتكثف بعد فى احتلال كل حجم الفخ. وقد أثارت هذه الصور الرائعة، على الأقل بالنسبة للفيزيائيين، دويًا كبيرًا عند نشرها ابتداء من ١٩٩٥. ومن وقتها فصاعدًا تقوم عشرات الفرق العلمية الأخرى فى العالم يوميًا بتحضير متكثف بوز - أينشتاين (Bose-Einstein) بواسطة أبخرة قلوية. وتستطيع مشاهدة ورصد خواصها لعدة ثوانى، وهو الزمن الذى تعود فيه هذه الحالة من المادة، رغم كل الاستقرار الظاهرى، إلى حالة أكثر استقرارًا.

لا يمكن هنا ذكر كل خواص هذه المتكثفات الغازية، التى وصفها فى محاضرة له كلود كوهن تانودجى (Claude Cohen-Tannoudji)، الحاصل على

---

(٤٥) M.H.Anderson, J.-R.Matthews, C.E.Wieman and E.A.Cornell, Science 269, 198 (1995).

(٤٦) W.Ketterle op. cit..

جائزة نوبل ١٩٩٧ عن أعماله فى مجال التبريد بـــالليزر. أود فقــط إنهـــاء هـــذا العرض المختصر للميوعة الفائقة بمناقشة درجة حرارة ظهور الميوعـــة الفائقـــة وبوصف الدوامات الكمية، وهى إحدى الأدلة البارزة للارتباط بين الميوعة الفائقـــة وتكثيف بوز – أينشتاين (Bose-Einstein).

إن هذه الغازات المختلفة الفائقة الميوعة تقدم أخيرًا مـــا كـــان الفيزيـــائيون يبحثون عنه منذ مدة طويلة، ألا وهو: متكثفات بوز – أينشتاين (Bose-Einstein) التى تكون فيها شدة التفاعلات بين الذرات متغيرة. تكون هذه التفـــاعلات ضـــعيفة جدًا فى الهيدروجين، وأكثر شدة قليلاً فى الصوديوم والروبيديوم٨٧، وتكون شدتها أكبر فى الروبيديوم٨٥. وكان يقتضى الاختبار المهم للنظرية إذن حـــساب تغيـــر درجة حرارة التحول فائق الميوعة مع التفاعلات، ثم التحقـــق مـــن صـــحة هـــذا الحساب. هل تزيد درجة الحرارة هذه أم تقل مع شدة التفاعلات؟ لقـــد تـــم نـــشر إجابات مختلفة ومتضاربة، لكن بشكل عام يتم حاليًا إقـــرار نتـــائج ب. جروتـــر (P.Grüter) ود. ســـيبرلى (D. Ceperley) (Urbana) وف. لالـــو (F.Laloë) (ENS,Paris).[٤٧] لقد توقع هؤلاء الباحثون الثلاثة فى عام ١٩٩٧ أن تزيد درجة الحرارة هذه قبل أن تنخفض. غير أن أعمال ربيى (J.Reppy) فـــى كورنـــل،[٤٨] يبدو أنها قدمت بداية تحقق من هذا السلوك غير الرتيب، والذى لم يكن من الـــسهل تخيله بشكل سابق للتجربة. ومما يثير الفضول أن ريبيى (Reppy) يعمـــل علـــى الهليوم المخفف فى زجاج مسامى، ويثير هذا الاستمرار للهليوم فى مقدمة اهتمـــام الفيزياء الكثير من الدهشة. فى الواقع، يبدو أن المرشح المثالى للتحقق الدقيق مـــن كل ذلك هو الروبيديوم٨٥، والذى تجرى الأبحاث عليه حاليًا.

---

(٤٧) P.Grüter, D.Ceperley et F.Laloë, Phys.Rev.Lett. 79, 3549 (1997)

(٤٨) J.D.Reppy, B.C.Crooker, B.Hebral, A.D.Corwin, J.He and G.M.Zassenhaus, Phys.Rev.Lett.. 84, 2060 (2000).

لنأتى أخيرًا إلى الدوامات الكمية.[٤٩] إن حقيقة إمكانية تمثيل السائل فائق الميوعة بدالة موجية يمكن أن ترى بالعين المجردة لها نتيجة أخرى باهرة، كما لاحظ فايمان (Feynman) (١٩٥٥) عقب أعمال أُنساجير(Onsager) (١٩٤٩). يجب أن يكون لهذه الدالة سعة وطور محددين فى كل نقطة فراغ، غير أن سرعة السائل فائق الميوعة ليست سوى المشتقة الفراغية لهذا الطور، ما عدا ثابت بسيط. إذن يتيح حساب أولى إثبات أن كل الدوامات متماثلة فى سائل فائق الميوعة مثل الهليوم٤ أو فى الأبخرة القلوية (حالة الهليوم ٣ أكثر تعقيدًا): يدور المائع حول قلب قياسى قطره صغير جدًا، وتساوى سرعة الدوران على مسافة r من هذا القلب h/mr حيث h ثابت بلانك و m كتلة الذرات. ماذا يحدث إذن عندما يوضع سائل فائق الميوعة فى حالة دوران بسرعة متزايدة؟ فى البداية تدور الجدران دون أن تجذب المائع. وعندما نبلغ السرعة الحرجة، تظهر الدوامات، الواحدة تلو الأخرى. وتشكل عندئذ شبكة منتظمة من الخطوط التى تتقارب باطراد كلما زادت سرعة الدوران. لقد قام و. ف. فينين (W.F.Vinen) عام ١٩٦١ بالتحقق من تكميم الدوامات، ثم تبعه آخرون. فى بركلى، فى الفترة من ١٩٧٩ – ١٩٨٢، نجح أى.ج.يارمشوك (E.J.Yarmchuk) ور. أى. باكارد (R.E.Packard) فى جعل شبكات الدوامات فى الهليوم مرئية. أخيرًا فى بداية عام ٢٠٠٠، حصل فريق جان داليبار (Jean Dalibard)، فى الـ ESN (باريس)، على صور دوامات فى متكثف روبيديوم وهى مماثلة بشكل لافت للنظر للصور التى تم الحصول عليها فى الهليوم. حاليًا، لا يمكن إذن لأحد أن يشك فى أن الميوعة الفائقة ظاهرة كمية، مرتبطة بشكل وثيق بتكثيف بوز – أينشتاين (Bose-Einstein).

---

(٤٩) يوجد كل شىء عن الدوامات الكمية فى كتاب R.J.Donnely. Quantized vortices in HeliumII,Cambridge Studies in Low Temperature Physics. Cambridge University Press. (Cambridge, 1991).

توجد سوائل أخرى فائقة الميوعة، لم أذكرها بعد. تقدم المادة النووية مثالين مهمين على الأقل لمثل هذه الموائع. فى النواة داخل ذرة ما، لا تكون درجة الحرارة بالضرورة منخفضة لكن تكون الكثافة ضخمة. لقد أوضحت دراسة دوران الأنوية الذرية أنه عندما يكون عدد النترونات وعدد البروتونات زوجيًا، يكونون جميعًا على شكل أزواج، ويشكلون بالتالى بوزونات ويتم تكثيفهم. إن خواص دوران الأنوية الفردية تكون مختلفة جدًا عنها بالنسبة للأنوية الزوجية. ومن المقبول بشكل عام، وإن كان بمقياس مختلف تمامًا، اعتبار أن انتفاضات النجوم ذات النترونات مرتبطة بميوعتها الفائقة. لقد اقترح الفكرة د.بينس (D.Pines) عام ١٩٧١، وعدلها ب.و.أندرسون(P.W.Anderson) ون.إيتوه (N.Itoh) عام ١٩٧٥، وهى تثير دائمًا أدبًا علميًا[٥٠] غزيرا. إن هذه النجوم نتجت من انفجار نجم متفجر فائق التوهج (سوبرنوفا)، عندما لا تكون الكتلة الكلية كافية ليؤول إلى ثقب أسود. يجب تخيل كتلة شمس، مركزة على نصف قطر عشرة كيلومترات (١٠^١٥/سم^٣!)، وتدور بسرعة جنونية (حتى ٣٠ لفة فى الثانية!) مشعة وميضًا مضيئًا. غير أن تردد هذا الوميض يقفز أحيانًا إلى قيمة مختلفة لكى يعود بشكل أبطأ إلى قيمته الأصلية. يعتقد عامة أن هذه "الانتفاضات" مرتبطة بانفكاك شبكة الدوامات الكمية فى مائع فائق الميوعة من النترونات المتزاوجة، تحت قشرة من النترونات الصلبة. ومن ثم، فإن الميوعة الفائقة خاصية من خواص المادة ولها نتائج أبعد بكثير من معاملنا.

أخيرًا، فيما تستخدم الموائع الفائقة؟ بالطبع، إن الهليوم فائق الميوعة مبرد فعال، بدونه كان لا يمكن للمغناطيسات فائقة التوصيل لبعض المسارعات الكبرى للجسيمات أن تعمل. وهو يوفر أيضًا منذ ثلاثين عامًا، مخلوطًا مع الهليوم٣ غير

---

(٥٠) D.Pines. Proc.x11 Int. Conf. Low Temp. Phys.. ed. E.Konda (Keigaku. Tokyo. 1971).
P.W.Anderson et N.Itoh. Nature 256, 25 (1975).

الفائق الميوعة، درجة حرارة الميللي كلفن الضرورية للقيام بدراسة مفصلة للتوصيلية الفائقة، والعديد من خواص أشباه الموصلات، والمغناطيسية، والزجاج، إلخ. وكما تسمح الأجهزة فائقة التوصيل (الـ "SQUIDS") بقياس المجالات المغناطيسية بدقة كبيرة جدًا، فإن من الممكن قياس حالات دوران مطلقة بواسطة مائع فائق الميوعة، مثل دوران الأرض، لكن ليس مؤكدًا أن هذه الطريقة أكثر كفاءة من الطرائق الأخرى. من ناحية أخرى، فبما أن الهليوم فائق الميوعة أكثر تنظيمًا من أى مائع آخر، فإنه قدم نموذجًا بارزًا لدراسة تغيرات حالة المادة، وهذه التغيرات ليست بالضرورة كمية. وهكذا لقد قمت لمدة طويلة بدراسة تبخر الهليوم ٤ فائق الميوعة (ظاهرة تشبه التأثير الكهروضوئى)، وتبلّر الهليوم فائق الميوعة (وهو ما أتاح لى فهما أفضل بكثير لسبب أن يكون للبلّورات أضلاع)، والتجوف الغازى فى سائل متحرك ومشكلات أخرى من مشكلات التنوى، أى تكون النوى على سطح متحول الطور، إلخ. أخيرًا، إن الانتقال إلى حالة الميوعة الفائقة يمثل فى حد ذاته نموذجًا تتم دراسته حتى فى السفن الفضائية لاختبار النظرية الحديثة لتغيرات الحالات المتصلة للمادة (المسماة "لإعادة المعايرة").

إن إحدى آفاق تطبيقات الغازات الفائقة الميوعة الأكثر إبهارًا هى بلا شك إنجاز الليزر ذى الذرات. فى الواقع، إن متكثف بوز (Bose) الغازى ليس سوى موجة متماسكة من المادة حيث الذرات غير قابلة للتمييز مثلها مثل الفوتونات فى ليزر عادى. وعندما يظل المتكثف محبوسًا فى الفخ، تكون هذه الموجة ثابتة فى الفخ. لكن يكفى ترك متكثف يهرب إلى خارج فخه لانبعاث موجة من المادة تنتشر وتكون قابلة أن تظهر نوع تداخلات الليزر الضوئى نفسه[٥١]، وهو ما أثبته ولفجانج كيترل (Wolfgang Ketterle) مع الصوديوم. ما تطبيقات مثل هذا الليزر الذرى التى يمكن أن تتحقق يومًا؟ أعتقد أننا لا نعرفها بعد. إن شيئًا واحدًا يبدو لى أكيدًا: لم تختتم بعد قائمة جوائز نوبل المرتبطة بالميوعة الفائقة، رغم أنها قائمة طويلة أصلاً.

---

(٥١) W.Ketterle, op.cit.

فيزياء كومات الرمل والمادة الرخوة(٥٢)

بقلم: اتيين جيون
Etienne GUYON

ترجمة: لبنى الريدى

ما المادة الرخوة؟

منذ حوالى ثلاثين عامًا، تشكلت جماعة علمية اهتمت بدراسة المــواد التــى ليست صلبة تمامًا ولا سائلة ولا غازية. وتعد الأوساط الحبيبية(٥٣) مثالاً تقليديًا غير انه توجد تطورات حديثة مهمة تستند على هذا المثال. سنبدأ بدراسة شــاملة لمــا تمثله " المادة الرخوة" (matière molle)، وهو مصطلح تنقصه الأناقة فضل عليــه الانجلو ساكسون صفة " لين" (doux) (مادة لينة soft matter)، فى حين تكلــم دو جينيه (de Gennes)، وهو أحد العلماء الذين قدموا أكبر مساهمة فى الموضـــوع، عن "أجسام هشة".(٥٤) لقد طال الحديث عن "مادة غير جيدة التكثيف" (على نقــيض الحالات "الجيدة" التكثيف لفيزياء الجوامد العادية المألوفة): حيث تــم أولاً دراســة السوائل، والزجاج والسبائك، وهو ما أوحى بالبحث الحالى عن "المادة فــى حالــة فوضى". كما تستخدم تسمية "نظم جزيئية منظمة" (SMO)، وهى موضوع تقريــر حديث فى أكاديمية العلوم،(٥٥) وتشير هذه التسمية إلى تجميع ذى هيكــل للأجــسام

---

(٥٢) نص المحاضرة رقم ٢٢٤ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١١ أغسطس ٢٠٠٠.

(٥٣) Guyon (E.) et Troadec (J.-P.), D u sac de billes au tas de sable, Odile Jacob, 1994.

(٥٤) Duran (J.) , Sables, poudres et grains, Eyrolles, 1997. Gennes (P. – G.de) et Badoz (J.), Les Objets.Fragiles, Plon,1994.

(٥٥) Systemes moleculaires organises, Rapport de l' Academie des Sciences, Tec et Doc, 2000.

الجزيئية التي يمكن أن تكون أكبر من الجزيئات المكونة لها. إن كل هذه التسميات غير دقيقة، وأحيانًا متناقضة (رخوة مقابل هشة) وتستحق توضيحًا لغويًا.

من الأبسط التوقف عند مثال يسمح بحصر هذه الجماعة العلمية بشكل أفضل. لقد اخترنا المثال من الطعام: إن الصلصة، والهلام، والنفيخة(٥٦) تعد أمثلة شائعة للمواد القابلة لتغير الشكل.

إن الباحث "الكيميائي – الفيزيائي" المهتم بالـ " نظم الجزيئية المنظمة" (SMO)، سيتعرف في هذه الأمثلة الثلاثة على الـ " مستحلبات"، والـ" زبد" والـ "جل"(٥٧). سيهتم إذن باستقرار الأجسام الغروانية المعلقة، وبالسطوح البينية التي تحتفظ بفقاقيع بخار ماء النفيخة داخل أغلفة، وبالراوبط بين سلاسل البوليمر في مثال الهلام الذي سنتتبعه لفترة أطول قليلاً. على نقيض محاليل " شرائط" البوليمرات المتشابكة والحرة الحركة نسبيًا، فإن الروابط الفيزيائية (مثل العقد) أو الكيميائية (تفاعلات بين سلاسل) تخلق جسورًا بين السلاسل الخطية. إن الزيادة التدريجية لمعدل الروابط، تؤدي في أول الأمر إلى زيادة لزوجة المحلول حتى تركيز حرج C_{cr}حيث تتباعد. عند تجاوز هذا الحد، نحصل على "جل" وهي مادة صلبة مرنة وضعيفة معامل مرونتها E ينمو بشكل مستمر ابتداء من الصفر إلى العتبة.

إذا تنوعت النظم البوليمرية وآليات التشابك، فإن " الباحث في مجال الفيزياء الإحصائية"، سيعكف على البحث على عمومية في عملية التحول إلى جل. إن العتبة تتطابق مع ظهور أول طريق جزيئي مستمر يربط نقاط المحلول المتباعدة جدًا، ويمكن وصف ذلك انطلاقًا من النظرية الإحصائية "الترشح". وبناء عليه، فإن تباعد اللزوجة (C) η يصفه القانون التالي: $\eta\,(C) = \eta_0\,(C_{cr} - C)^{-S}$

---

(٥٦)طعام خفيف ينتفخ بالطهو لاحتوانه على البيض المخفوق. (المترجم)

(٥٧)مادة هلامية أو صلبة تتشكل من محلول غرواني. (المترجم)

حيث الأس S الذى يعطى سرعة التباعد لا يتوقف على النظام الفيزيــائى – الكيميائى. وينطبق الشيء نفسه على الأس t الخاص بمعامل المرونة مثل:

$$E(c) = E_0 (C - C_{cr})^t$$

فى حين أن C_{cr} ، E_0 ، η_0 يتوقفون على تفصيلة خاصة بالكيمياء الفيزيائية. إن ذلك هو مثال للسلوك العام للظواهر الحرجـــة، كمـــا وصـــفها هنـــا بالتحديـــد إ. بريزين (E. Brézin).[٥٨]

إلى جانب الكيميائى والفيزيائى، يهتم الباحث فى مجال "مبحث الأنـسياب"[٥٩] (يقول هرقليطس (Heraclite)، إن كل شيء ينساب) بالقوانين الميكانيكية المعتمـــدة على الزمن أو التردد (كما فى حالة هلام يتم رجه)، حيث يمكـــن للمـــادة أن تبـــدو جامدة أو سائلة تبعًا لزمن الاستثارة إن كان قصيرًا أو طويلاً، أمام من يرتب تغييـــر شكل المادة (مثل: الزمن الذى تستغرقه سلسلتان لكى تفكا تشابكهما).

إن جماعة الفيزيائيين التى أنتمى إليها هى مجموعة ليس لها صفة رســمية تعرف بالـــ "MIIAM" (أوساط احتمالية عيانية، المزيد من التسمية !) التى كوناها منذ عشرين عامًا مع ب.ج.جينيه (P.-G de Gennes)[٦٠] ور.بلانـــك (R.Blanc) للمقابلة بين مشكلات المادة المضطربة – مادتنا الرخوة – والأدوات التـــى هيأهـــا الفيزيائيون بالنسبة للمادة المكثفة.

ويتضح من هذه الدراسات خاصية رئيسية، أقتـــرح تـــسميتها "مبـــدأ 3M". يلاحظ، عند المستوى "المجهرى"، تفاعلات موضعية بين العناصـــر، مـــثلاً بـــين حبيبتين أو حلقتين صغيرتين من سلاسل بوليمر. وللحصول على قوانين "عيانيـــة"، أى ترى بالعين المجردة، يمكن محاولة حساب متوسط القوانين الموضـــعية دفعـــة واحدة. إن مثل هذه القوانين المتجانسة قيمة جدًا وتنسى التفاصيل الموضعية لكـــن

---

(٥٨) انظر المحاضرة رقم ٢٢٠ من جامعة كل المعارف.

(٥٩) يشمل اللزوجة والمرونة واللدانة. (المترجم)

(٦٠) Gennes (P.-G.de). "La percolation". La Recherche 7, (1994).

الانتقال المباشر ليس ممكنًا فى أغلب الأحيان ويتعين أخذ فى الاعتبـــار مقـــاييس الحجم "متوسطة المدى". كانت تلك حالات الجل (الهلام) سابقًا حيث يوجـــد، عنـــد عتبة الترشح، حلقات وعقد من جميع مقاييس الحجم تساهم فى السلوك الميكانيكى. إن مثل هذه البنية المسماة "كسورية متعددة المقاييس" (fractale)(٦١) (أداة أخـــرى من أدوات الفيزياء الإحصائية)، تقاوم أية معالجة تهدف إلى تجانس السلوك، لكـــن الفيزياء الإحصائية للـــ "MIAM" أخذت فى الاعتبار هذه البنية انطلاقًا من طرائق تتشابه مع طرائق التكرار فى الرياضيات.

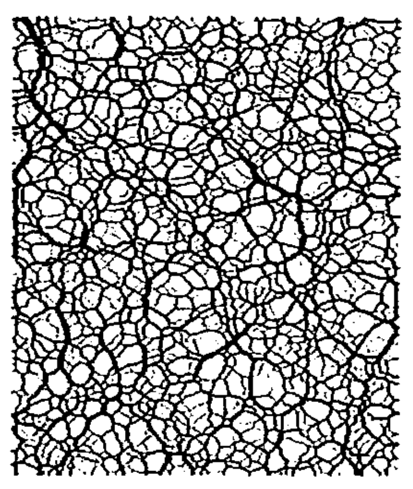
كومة الرمل

إن تكدسات الحبات تشكل مثالاً خاصًا سوف ندرسه. تتكون الكومـــة مـــن مجموعة من الحبات لكنها تكون كلاً (" القياس المتسلسل"– أو كومة – العزيز على الفلاسفة) مختلفًا عن مجموع الخواص الفردية لعناصره. وإذا اهتممنـــا بخواصـــه الميكانيكية مثلاً، فإنها لا تختزل فى معرفة التماس البسيط بين حبتين مضغوطتين. من المعروف جيدًا من خلال قضية هرتز (Hertz) أن تغير شكل حبتين مـــرنتينδ يزيد مع القوة الضاغطة F كـــ$F^{2/3}$. لكن بالنسبة لتكدس من الحبيبات يزيـــد تغيـــر الشكل العام Δ مع القوة F، بالأصح كـــ F^xحيث X تساوى من١/٥ إلـــى ١/٤ أى بسرعة أقل بكثير. إن ذلك يفسر حقيقة أن عندما تزيد القوة، تتكون تماسات جديدة: تقسو المادة. ويتعين السير طويلاً على طريق جديد من أجل مجانسة هذه التماسات. ويمكن رؤية عدم تجانس التماسات بصريًا بواسطة قياسات ضوئية مرنة، ولقد تـــم دراسة عدم التجانس نظريًا وعدديًا مع الأخذ فى الاعتبار حقيقة أنه لا توجـــد قـــوة بين حبيبات إلا عندما يضغط عليها وليس عندما تفصل عن بعضها البعض (تـــأثير الصمام الثنائى): يعرف الجميع أن كيس البن المطحون يفقد صـــفاته الميكانيكيـــة

---

(٦١) B.Mandelbrot, "Les objets fractals", Champs Flammarion (1995). Guyon (É.) et Stanley (H.E.), Les Formes Fractales, Elsevier, Éditions de la Découverte (1995).

عندما يلغى الفراغ، وأن الإجهاد السابق للخرسانة يهدف تحديـدًا إلـى الاحتفـاظ بالحبيبات بشكل دائم تحت ضغط. ويوضح الشكل رقم (١) نتيجة تجربـة عدديـة على نموذج من أقراص مرصوصة فوق بعـضها (أو إسـطوانات ذات محـاور متوازية). إن السلاسل المتصلة تمثل خطوط حبيبات مضغوطة بشدة وهى تتحمـل عمليًا كل الثقل. وتكون كل الحبيبات الأخرى إما حرة أو تتحمـل أثقـالاً خفيفـة وتحافظ على النظام الإجمالى. ليس مطروحًا تحقيق مجانسة مثـل هـذه المـشكلة الميكانيكية طالما أن الهندسة المتعددة المقاييس (مقياس متوسط المدى) المتكونة من كل هذه السلاسل المتصلة هى التى تتحكم فى صلابة المجموع. على النقيض، فإن المسألة تشبه مسألة الـ "الترشح" حيث ستحل الصمامات الثنائية محـل الـروابط الموصلة. هذا المثال يوضح أيضًا المفهوم التقليدى لتأثير الـ "القبب": إن السلاسل المضغوطة تشكل أقواسًا احتمالية "تحمى" من الإجهاد الحبيبات الواقعة تحتها.



الشكل (١)

توزيع القوى (يعطى عرض الخطوط شدتها) فى تكدس عددى للأقراص خاضع للضغط. نلاحظ عدم التجانس الكبير للإجهاد الذى يتوزع على امتداد خطوط القوى ووجود أغلبية من الحبيبات مضغوطة ضغطًا خفيفًا جدًا.

(F. Radjai, S.Roux et J. J.Moreau, Phys. Rev. Lett. 80, p. 61 «1998»)

إن هذه المادة الصلبة لا تصبح حالة مرضية إذا التحمت الحبيبات معًا كما في الحجر الرملي، أو في حالة الحبيبات الفلزية التي تلتحم فيما بينها بالحرارة أو تحت ضغط مكونة مادة "مزججة"، إن مثال "الخرسانات ذات الأداء العالي" يستحق أن يذكر بسبب المزايا الكبيرة التي تمنحها هذه المواد الجديدة الخاصة بالبناء، ولعلاقتها مع مجموع المواد التي تدخل في تكوين البناء مثل الملاط والخرسانة. في وسط يتكون من حبيبات لها الحجم نفسه، قد يصل جزء الفراغ (أو المسامية) P إلى ٣٠ %. إن حالة مدرسة الملء الابولونية تقضي بأنه إذا وضعنا الحبيبات بطريقة تكرارية انطلاقًا من الحبيبات الكبيرة وبملء الفراغات المتروكة بحبيبات أصغر ذات الحجم المناسب وهكذا دواليك: تلغى المسامية كحد أقصى، تقريبًا مثل $(d/D)^{1/5}$ حيث d و D هي الأحجام القصوى. في الخرسانة ذات الأداء العالي، نحاول الاقتراب من هذا الحد بعملية ملء بحبيبات ذات أحجام متنوعة مما يسمح بتقليل كمية الماء المضافة بما أن المسامية ضعيفة. هذا بالإضافة إلى أنه ينتج عن ذلك تقليل نفاذ العوامل الخارجية التي هي مصدر تآكل الخرسانة. لقد وجد أن المساحيق الدقيقة لدخان السيليس (الصوان) التي تضاف (مقياس حجم صغير d) هي أيضًا متفاعلة وتحقق تماسكًا للمجموع. وتكون النتيجة كالتالي: بينما تقاوم الخرسانة العادية ضغطًا يساوي ٢٠ Mpa (ميجاباسكال) في اتجاه الانضغاط، وقليلاً جدًا في اتجاه الشد (تأثير كيس البن في ظل الفراغ)، تستطيع هذه الخرسانة مقاومة ضغطًا يساوي ٦٠٠ Mpa في اتجاه الانضغاط و ٢٠ Mpa في اتجاه الشد، مما يعني أن خرسانات "مرنة" قد تحققت تقريبًا! أخيرًا بإضافة مساعدات بوليمرية، يمكن الحفاظ على هذه الخرسانات في حالة مائعة بدرجة كافية لحظة وضعها في مكانها، رغم أنها متماسكة وتفتقر إلى الماء. ويمكن رؤية النتيجة في قوس الدفاع أو جسر نورماندي.

لكن، لنعود إلى المواد الأكثر تطابقًا مع المفهوم الأصلي للمادة الرخوة، وذلك بالذهاب إلى الشاطئ عند الجزر. عندما نضغط بالقدم على الرمل المبلل، نلاحظ - يالها من مفارقة!- أن الرمل يجف حول القدم. هذه الظاهرة المسماة

"التمددية" (dilatance) وصفت أول مرة بواسطة رينولدز (Reynolds) منذ حوالى مائة عام. إذا كانت الحبيبات متلاصقة، يتعين أولاً، لتحريك الحبيبات، فك التكدس من أجل زحزحتها. إن المسامية تزيد ويتم شفط الماء. كان الأمر سيختلف لو بدأنا بتكدس رخو يتم ضغطه.

فى الواقع، توجد اختلافات كبيرة بين هذه التكدسات القصوى، رخوة ومتماسكة، كلاهما غير منتظم، ولا يمكن الانتقال ببساطة من واحد إلى الآخر. لكن، حتى فى الحالة الأبسط حيث الحبيبات كرات غير قابلة لتغير شكلها ولها القطر نفسه، لا نعرف تمامًا وصف مجموع حالات التكدس الفوضوى للحبيبات التى تتطابق مع الكم الكبير للطرائق المختلفة لتكوين تكدسات برج الحبيبات وتكديسها! إن فيزياء التكدسات الحبيبية لم تحظ دائمًا بما يوازى أبحاث بولتزمان (Boltzmann) لفهم الحالة الغازية!

انسياب الرمل

جعل الرمل ينساب بين الأصابع يستحضر الحالة السائلة، غير أن مراقبة انسياب الرمل فى الساعة الرملية سيقنعنا بنقيض ذلك. فبخلاف الساعة المائية التى يقل تدفق الماء منها عندما يقل ارتفاع ماء الطبقة العليا، فإن تدفق الساعات الرملية يظل ثابتًا حتى النهاية تقريبًا: بينما يقل الضغط الهيدروستاتيكى الذى يحدد التدفق عندما ينخفض ارتفاع الطبقة السائلة العليا، فإن الضغط الراجع لوزن الحبيبات ينطبق على الجدران الجانبية للساعة الرملية بتأثير القبة، ولا يؤثر فى التدفق.

لكن التأثير الأكثر إثارة للدهشة هو بلا منازع حقيقة أن سطح توازن الكومة ليس أفقيًا (شكل رقم ٣). إن الرمل الذى يتم صبه من فتحة صغيرة يرسب مكونًا مخروطًا له زاوية رأس محددة تمامًا. إن هذه التجربة البسيطة أسالت حبرًا كثيرًا - آسف، رملاً - منذ أن اقترح الفيزيائى بير باك (Per Bak) قبل عشر سنوات، أن هذه الزاوية الثابتة تمثل حالة خاصة من السلوك الحرج المسمى ذاتى

التنظيم[٦٢] (Self orgainzed criticality or SOC). فى الظاهرة الحرجة العادية، "يكتفى بالمرور فقط" بالنقطة الحرجة (مثلاً، بعتبة التجمد عندما نزيد عدد الـــروابط بين السلاسل). هنا، "تحافظ" الانجرافات (التى تلعب دور التقلبـــات قـــرب نقطـــة حرجة) على النظام حول حالته الحرجة. لقد اقترحت تطبيقات متنوعة للـــ Soc: التوازن البيئى للكرة الأرضية أو تأثير "جايـــا" (Gaia)، علـــم الـــزلازل، تقلبـــات البورصة. إلا أن النموذج الأصلى لم يكن جيدًا جدًا. يوجد فـــى الواقـــع زاويتـــان حرجتان: الزاوية القصوى θ_M التى بعدها تنطلق الانهيارات الثلجية، وزاوية دنيـــا حيث تتوقف الانهيارات: $\theta_I = \theta_M - \delta$

إن الزاوية δ التى تساوى بضع درجات تفـــسر تـــأثير انفكـــاك الحبيبـــات الضرورى للسماح بالانسياب (تأثير التمددية Dilatance).

لقد تم مؤخرًا فى كمبريدج وباريس تطوير نماذج متصلة لديناميكا الانهيارات الثلجية.[٦٣] تعتمد هذه النماذج على وصف قيام طبقة عليا ورقيقة ومتحركة بتبـــادل المادة مع الطبقة السفلى الثابتة، وتم عرض العديد من الظواهر الخاصـــة بالكومـــة التى ترصد بشكل شائع. إن حركة الكثبان هى تطبيق يدرس حاليًا، حيـــث يتوافـــق تأثير الانهيارات خلف الكثبان التى تغذيها على الجبهة الأمامية الحبيبـــات الـــساقطة، تحت تأثير الريح، عن طريق آلية تسمى "طفر" (saltation).[٦٤] إن انسياب الطبقـــة السطحية فى انهيار جليدى يوحى بانسياب طبقة سائلة. ويمكن دراســـتها بوضـــع طبقة سميكة من الحبيبات بين صفيحتين يتم تحريكهمـــا بـــشكل متـــواز بالنـــسبة لبعضهما البعض: إن الطبقات القريبة من الصفيحة المتحركة هى فقط التى تنتقل.

بدلاً من هذا الوصف المتصل، يمكن الاهتمام بـــسلوك عـــدد صـــغير مـــن الجسيمات. وكحد أقصى، ننظر إلى نزول حبيبة واحدة على طبقـــة خـــشنة مائلـــة

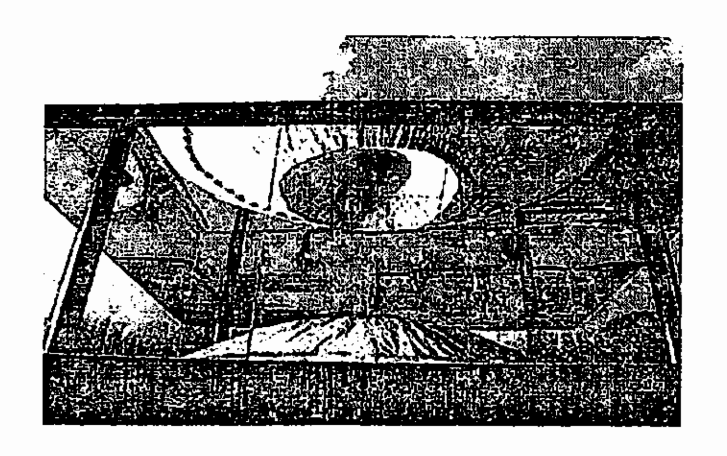
---

(٦٢) Bak (P.), Quand la nature s'organise, Flammarion, 1999.

(٦٣) Bouchaud (J.-P.), Cates (M.),Prakash (R.) et Edwards (S.-F.), J.Phys. 4 1383 (1994).
Boutroux (T.) et Gennes (P.-G.de), CRAS (Paris) 324 85 (1997).

(٦٤) انتقال وثبى للجزيئات المنجذبة بواسطة سائل. (المترجم)

متكونة من حبيبات ثابتة. إن الحركة غير المنتظمة لهذا النزول تشبه ظاهرة الـــــ "التشتت" حيث تتراكب حركة متوسطة وانتشار يميز التأثيرات الصغيرة الاحتمالية الناتجة عن التصادمات. لكن، إذا كان الانتشار والتشتت يشجعان الامتزاج فى حالة السائل فإن التشتت فى حالة الحبيبات يعمل على الفصل. يكفى ملاحظة ركام جبـــل حيث توجد الكتل الكبيرة أسفل المدفع الحجرى. وتوضح تجارب نموذجيـــة بـسيطة تستخدم خليطًا من الحبيبات ذات أحجام وأشكال مختلفة يتم صبه لتكوين كومة، أنـــه يمكن الحصول فى آن واحد على تأثيرات ترسب (فصل من الأســفل إلـــى أعلـــى) وتأثيرات فرز لطبقات متناوبة من الحبيبات، يمكن مقارنتها علـــى مقيـــاس صـــغير بالتركيبات الجيولوجية التى نلاحظها فى مقاطع الصخور الرسوبية (الشكل رقم ٢).

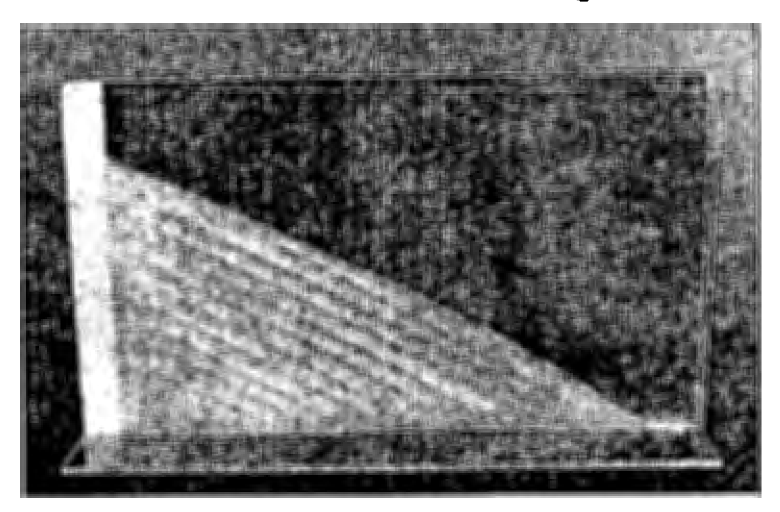


الشكل (٢)

يتم تكوين انهيار من حبيبات ذات حجمين، وذات طبيعة ولون مختلفين، وذلك بصب خليط فى حيز بين لوحين متوازيين من الزجاج. نلاحظ فى آن واحد تأثير ترسب وتأثير فرز منتظم، وتمنحنا الملاحظات الطبيعية على الكتل الصخرية الرسوبية العديد من الأمثلة على ذلك.

H.A.Makse, P.Cizeau and H.E, Stanley, Phys. Rev. Lett. 78, p. 3298 (1997).

تتدخل معالم (بارامترات) متنوعة: مرور حبيبات صغيرة عبـر المسافات بـين الحبيبات الكبيرة، سقوط أسرع للحبيبات الكبيرة عند السطح، تغير الزاوية الحرجة للانهيار تبعًا لوضع زوايا الحبيبات. إن مثل هـذه التـأثيرات الخاصـة بالفـصل التلقائى، التى تربك الحدس، شائعة فى فيزياء تكدس الحبيبات وتبين جيـدًا أنـه لا يمكن تمثيلها كوسط مائع تقليدى.



الشكل (٣)

إنجاز جون برنار متيه (Jean- Bernard Métais) الضخم الرائع "زمن ممنوح كسوف ١٩٩٩/٢٠٠١" الموضوع فى حديقة النباتات فى باريس فى إطار مشروعات عام ٢٠٠٠، يبين الخواص المتنوعة الأصلية للرمل الذى ينساب (صورة Guy Durand)

غاز الرمل ؟

إذا كانت الحبيبات المتراصة فى حالة الانسياب لا يمكـن تمثيلهـا بـسائل، فيمكن تصور أن الحبيبات المتباعدة المتصادمة هى نموذج للغـاز يـرى بـالعين المجردة، كما اقترح ذلك حدس الفلاسفة الأقدمون.

لنرى أولاً الاستراتيجيات لفصل الحبيبات.

يمكن رجها بوضعها على لوح أفقى مهتز. إذا كانت العجلة الرأسية aw^2 (a السعة، w تردد الاهتزازة) كبيرة بما يكفى مقابل الجاذبية g، فإن الحبيبات ستظل فى الهواء خلال جزء من الاهتزازة كما هو الحال على المقفزة. وتوحى الصدامات بين الحبيبات بالإثارة الحرارية للغازات، لكن لم يتم العثور على المعادل لنظرية تجزئة الطاقة الحركية بالتساوى (التى هى فى هذه الحالة مستقلة عن كتلة الجسيمات). الأسوأ، إن رج خليط من الحبيبات باعتدال سيؤدى من جديد إلى فصل الحبيبات تبعًا للحجم، وسنجد مجددًا الحبيبات الكبيرة فى الجزء العلوى للكومة (نلاحظ ذلك عادة عند رج علبة كورن فليكس!). من ناحية أخرى، إذا لم تكن العجلة كبيرة جدًا فإن سطح الكومة لن يظل أفقيًا، لكنه " ينقبض" مشكلاً مخروطات منتظمة حيث تصعد الحبيبات إلى مركزها وتنزل مجددًا فى شكل انهيار جليدى على الحواف الجانبية.

وبدلاً من محاربة الجاذبية بعجلة رأسية، يمكن معادلتها بخلق حركة مانع صاعدة حول الحبيبات. عند وضع كومة على شبكة أفقية رقيقة وإمرار غاز خلالها، ستنطلق حبيبات هذه الكومة عندما تتساوى قوة الاحتكاك على الحبيبات، أو قوة ستوك (Stokes)، مع وزن الحبيبة. إن هذا الأسلوب ليس مجرد تجربة معملية، بل إن أسلوب " التمييع" هذا يلعب دورًا صناعيًا كبيرًا ويستخدم فى كل مرة يراد فيها تحقيق تلامس حميم بين طور حبيبى وطور مائع. وعندما تكون سرعة المائع مرتفعة بما يكفى، تحتل الطبقة المحتوية على المائع كل حجم الوعاء الدائرى الرأسى الذى يحتويها وتصبح غير مستقرة مكونة فقاعات مائع، تفتقر إلى الحبيبات، وترتفع هذه الفقاعات فى خليط حبيبات - مائع أكثر تركيزًا. وتنفجر عند السطح، مثل فقاعات غاز سوقية فى ظاهرة الغليان. فى الواقع، يتم وضع نماذج لحالات عدم الاستقرار تلك على أنها ظاهرة الحمل الحرارى العادية لقدر موضوع على النار. إن مثل حالات عدم الاستقرار تلك تعرقل بشكل خطير أجهزة التمييع الصناعية.

والطريقة الأخيرة للحفاظ على الحبيبات معلقة هى تفرقها فى سائل له الكثافة نفسها. إن ديناميكا مثل هذا السائل المشحون هى ديناميكا مائع تزيد لزوجته مع تركيز الحبيبات. تقول صيغة تقليدية توصل إليها أينشتاين إن لزوجة معلق مخفف، تركيزه الحجمى c تزيد مثل (1+2,5 c)، إذن تزيد ١٠ % عندما نضع ٤ % من الحبيبات من حيث الحجم فى سائل نقى.

لكن، عند كثافات الحبيبات العالية، تتدخل مجددًا تأثيرات تزاحم الحبيبات، وتتباين اللزوجة عندما تصبح كل حركة مكبوحة. سيتوقف الأمر بالطبع على هندسة الانسياب كما فى حالة انسياب الحبيبات الجافة. إن الحد الأقصى لتكدس متماسك مشبع بالماء هو تكدس "الرمل المتحرك". إذا رجعنا إلى عرضنا عن مبحث الانسياب، نرى أنه بالنسبة لرمل تم إثارته فى مدى زمنى قصير، فإن مجموع حبيبات – سائل لا يتوفر لها الوقت الكافى لتعيد تنظيم نفسها، ويظل الوسط جامدًا. على النقيض، سنغوص كما فى سائل لزج إذا قمنا بحركات بطيئة.(٦٥) إلى من يحسن الاستماع...

ما لم يتم قوله

إن عرضنا لم يستوفِ الدراسات عن المادة الحبيبية. لقد استخدمنا حبيبات غير قابلة أن يتغير شكلها وذات حجم كبير، وليست " حبيبات رخوة" أو " قابلة للكسر". إن عملية السحق تعنى العديد من الصناعات، وهى إحدى المصادر الرئيسية لاستهلاك الطاقة على الأرض (طن سنويًا لكل فرد). إن عملية السحق غير فعالة بشكل رهيب وتظل غير مفهومة بالشكل الصحيح. ومن الواضح أن عدم تجانس توزيعات القوى بين الحبيبات يلعب دورًا رئيسيًا.

---

(٦٥)سنعيد قراءة الوصف الرهيب الذى قدمه فيكتور هوجو عن الوحل فى رواية البؤساء (الوحل، لكن الروح).. عندما "لا يوجد ما يميز الأرض الصلبة عن تلك التى لم تعد كذلك".

لم يأخذ العرض فى الاعتبار التأثيرات بين الحبيبات، إلا فيما يتعلق بالتأثيرات المرنة بين الحبيبات المتماسكة. إن تماسك الرمل المبلل ينبع من وجود جسور شعيرية بين الحبيبات المتجاورة، وينتج عن ذلك انخفاض فى الضغط، ناجم عن الأسطح الهلالية (ménisques)، يجذب الحبيبات.

فى حالة الحبيبات الصغيرة - حجمها أقل من ميكرون - يتعين الأخذ فى الاعتبار "الاضطراب الحرارى التلقائى". من ناحية أخرى، ستلعب عندئذ التأثيرات الكيميائية للتفاعل دورًا أساسيًا، وتصبح دراسة تكدساتنا المتماسكة ذات نفع ضئيل لفهم تنظيمات الحبيبات التى غالبًا ما تكون رخوة ومتعددة المقاييس (كسورية Fractales). لكن يشكل ذلك فصلاً مختلفًا تمامًا من المادة الرخوة، هو دراسة الـ " شبه غرويات " التى من المؤكد أنها تستحق محاضرة من محاضرات جامعة كل المعارف.

شكر

أشكر كل الشركاء فى مجموعة أبحاث CNRS، عن الأوساط غير المتجانسة الذين هم أصحاب هذه المساهمة. شكر أيضًا لفارهانج رادجيه (Farhang Radjai) وهرمان ماكس (Hernan Makse) لإرسال المستندات ولجوليان جيون (Julien Guyon) للتبادلات النقدية.

كيف كانت ثورات المعلومات والاتصالات ممكنة؟
أشباه الموصلات[٦٦]

بقلم: كلود ويسبوش
Claude WEISBUCH

ترجمة: لبنى الريدى

مقدمة

إن ثورات المعلومات والاتصالات، الناتجة عن اكتشافات فى مجال أشباه الموصلات، تمثل أحد الأحداث البارزة للقرن العشرين وستستمر فى قلب كل مجالات النشاط البشرى رأسًا على عقب فى هذا القرن الجديد.

لقد كرمت لجنة نوبل فى العام ألفين الرواد الذين جعلوا هذه الثورات ممكنة: بعد الجائزة التى منحت فى العام ١٩٥٦ لكل من باردين (Bardeen) وبراتين (Brattain) وشوكلى (Shockley) لاختراع الترانزستور (transistor)، تم منح كيلبى (Kilby) من ناحية، وألفيروف (Alferov) وكرومير (Kroemer) من ناحية أخرى، على التوالى جائزة نوبل لاختراع "الدائرة المتكاملة"، التى تعد أساسًا لتفجر علم الإلكترونيات الميكروية، ولاختراع "التراكيب غير المتجانسة شبه الموصلة"، التى سمحت بين أشياء أخرى، بالحصول على أنواع الليزر المستخدمة فى الاتصالات عن بعد. إن جائزة نوبل هذه لافتة للنظر لأكثر من سبب، فهى تكافئ بشكل خاص "اختراعات" تم إشهارها ببراءات اختراع (بالنسبة لكيلبى Kilby وألفيروف Alferov)، وليس "اكتشافات علمية" بالمعنى المعتاد للكلمة، نشرت فى مجلات علمية وقيمت من جانب نظراء.

---

(٦٦) نص المحاضرة رقم ٢٢٥ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٢ أغسطس ٢٠٠٠.

إن أشباه الموصلات، واستخدامها فـــى الترانزســتور والليــزر والـــدوائر المتكاملة، تحتل إذن مكانًا خاصًا فى الاكتشافات الكبرى للقرن العــشرين، نظــرًا لتأثيرها حتى على أسلوب حياتنا. هناك العديد من الأسباب الأخرى التى تــضيف للمكانة الرئيسية لهذا المجال فى تاريخ العلوم والتقنيات.

- إنه مجال تكنولوجى ولد بالكامل من الفهم "الأساسى" للمادة الصلبة. حاليًــا، تعمل الـــ ٩٠ مليار قطعة من المكونات المنتجة كل ثانية (١٥ لكل شخص من سكان الأرض فى كل ثانية!) تمامًا كما توقعت لها النمـــاذج الفيزيائيـــة المجهرية المستخدمة فى برامج اختراع الدوائر.

- عكسيًا، تسمح تكنولوجيا الدوائر المتكاملة، منذ بضع ســنوات، باستكــشاف مجالات أساسية جديدة. فهكذا أتاح تأثير Hall الكمى فى التركيبـــات غيــر المتجانسة، الفرصة لجائزتى نوبل. وسيكون هناك بالطبع المزيد من الجوائز المعتمدة على أشباه الموصلات وتركيباتها.

- لقد نشأ هذا المجال من بحث أساسى طويل المـــدى، أجـــرى فـــى معمــل صناعى. ولفترة طويلة ظلت هذه التجربة تمثل الأساس للنمـــوذج المقبــول حتى بداية الثمانينيات من القرن العشرين، والقائل إن على الصناعة أن تقوم بنفسها بالبحث الأساسى.
- هناك اندهاش متجدد أمام "التقدم الأسى" المستمر، فى كل من الأداء والتكلفة (شكل رقم ١).
- لقد فتح المجال ميادين صناعية جديدة أدت إلى تجديد المشروعات الصناعية الأكثر أهمية، وكان سببًا لما يسمى بـــ "الاقتصاد الجديد". فــضلاً عـــن أن تأثيره يتواجد فى كل قطاعات النشاط، صناعية كانـــت أو خدميـــة، نظــرًا لطابعه الذى يتسم بتكنولوجيا مستعرضة و"ذات قدرة على الانتشار".

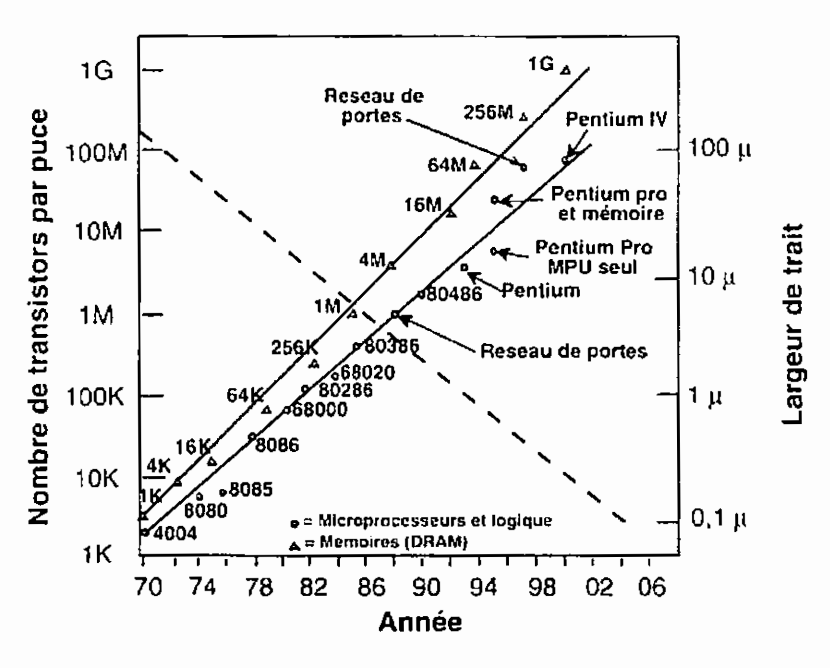
- كان المجال سببًا فى أشكال جديدة من المنظمات والـــديناميات الـــصناعية. فوادى السيليكون يستمد اسمه من شركات منتجات الإلكترونيات الميكرويـــة

المصنوعة من السيليسيوم، والتى تتخذ قاعدتها حول سان فرنسيسكو وجامعة ستانفورد. لقد قدمت هذه الشركات مثالاً صناعيًا جديدًا، يعتمد على التوزيع والانتشار وسهولة حركة الأفراد (أول شركة، وهى شركة شوكلى (Shockley) ولدت من معامل بل، وأنشأ المنشقون عن شوكلى (Shockley) شركة Fairchild، ثم شركة Intel). ويمكن رسم روابط وراثة بين مئات الشركات فى وادى السيليكون. إن سرعة تطوير منتجات ووحدات صناعية جديدة تمثل سمة مميزة أخرى للاقتصاد الجديد.

إن ثورات المعلومات والاتصالات هذه نشأت من تشفير المعلومات فى شكل حزم من الإلكترونات ("حبيبات" الكهرباء) أو الفوتونات ("حبيبات" الضوء) (بضع عشرات الآلاف من الإلكترونات أو الفوتونات من أجل عنصر المعلومات، "البيتة") ومن القدرة على معالجة ونقل هذه الحزم من الإلكترونات أو الفوتونات بطريقة فعالة واقتصادية بشكل متزايد.

إنهم يبشروننا بمجتمع ينتقل من الثروات "المادية" إلى "غير المادى"، "مجتمع المعرفة". يمكن مناقشة ذلك، لكن من وجهة نظر الفيزياء فصحيح أن الكميات الحاملة للمعلومات صغيرة جدًا: إن أكبر مكتبة فى العالم، مكتبة الكونجرس بواشنطن، تضم عشرين مليون مجلد. إذا اعتبرنا أنه يمكن تشفير الكتاب الواحد فى ٥٠ مليون بيتة، فإننا نحتاج إلى $١٠^{١٥}$ بيتة لتشفير كل الكتب. وإذا شفرنا كل بيتة بوجود أو غياب الشحنة الكهربية لـ ١٠ آلاف إلكترون، سيتم نقل المكتبة بواسطة $١٠^{١٩}$ إلكترونًا، أى عدد الإلكترونات المنقولة فى ثانية واحدة فى تيار قدره واحد أمبير! بمقاييسنا العادية، لا يحتاج تشفير المعلومات فعليا إلا لكمية صغيرة جدًا من المادة. ولذلك تكون معالجتها سهلة وفعالة. إن القدرة على نقل المعلومات فى تقدم مستمر بفضل الاتصالات عن بعد: إن خلية ضوئية واحدة، تغذيها أشعة ليزر ذات أشباه موصلات، تنقل الآن ٣×١٠^{١٢} بيتة (أى ٣ ترابيتات) فى الثانية. يحتاج الأمر إذن إلى ٣٠٠ ثانية لنقل كل مكتبة الكونجرس! ولإدراك القدر الحقيقى لثورة المعلومات، يكفى تأمل كمية المعلومات المنتجة سنويًا (راجع

(http://www.sims.berkeley.edu/how-much-info/index.html)، فـــى شـــكل كتب وصحف، وصور ثابتة أو متحركة (أفلام)، وبيانات على إســـطوانة مدمجـــة روم (ذاكرة يمكن قراءتها فقط) أو إسطوانات مغناطيسية (إن هذا النوع الأخير من الأرشفة هو الأهم): ٢ أتوبايت ثمانية (واحد بايت ثمانية = ٨ بيتات، منها ٠,٠٠٣ فى المائة فقط فى الشكل المطبوع)، أى ٣٥٠ جيجا بايت ثمانية لكـــل واحـــد مـــن سكان الأرض! فضلاً عن أن جزءًا كبيرًا من هذه المعلومات متاح حاليًـــا بـــشكل مباشر فى العالم كله عبر الاتصالات عن بعد.



الشكل (١)

منحنى تقدم الدوائر المتكاملة، أو المشغلات الدقيقة (وحدات مركزية للحاسوب) أو ذاكرات دينامية ذات توصل عشوائى (DRAM رام دينامية). ويرجع هذا التقدم إلى القدرة على تصغير الحجم بشكل كبير، الذى يتميز بـــ "عرض الخط"، وهو أصغر عنصر تم صنعه فى "جيل" ما من الدوائر المتكاملة.

لقد أصبح كل ذلك ممكنا بفضل تقدم المكونات والنظم المصنوعة من أشباه الموصلات، والمرتبط بإجراءين متزامنين إدماج العناصر الفعالة على الدعامة نفسها، الـ "رقاقة"، والتصميم بحجم صغير. وكانت إحدى أكبر المفاجآت هى السمة "الفاضلة" للتصميم بحجم صغير: كلما كانت المكونات صغيرة، كان التشغيل أفضل! وبالتالى أمكن فى ٣٥ عامًا كسب فى آن واحد عدة عوامل تتراوح ما بين ١٠٠مليون إلى مليار، تتعلق بتشعب الدوائر، وخفض التكلفة (الرقاقة الإلكترونية المصغرة التى تضم مئات الملايين من الترانزستورات تكلف ثمن الترانزستور الواحد نفسه فى الستينيات من القرن العشرين)، والقدرة على العمل بشكل جيد فى ظل الظروف المختلفة، وعائد الإنتاج.

لا يستطيع هذا النوع من التقدم الأسى أن يستمر إلى ما لانهاية. إن مشكلة الحدود الفيزيائية تطرح نفسها بطرائق عديدة: إلى أى حد يستطيع تصغير الحجم أن يستمر؟ كم عدد الذرات التى يجب توفرها لصنع ترانزستور يعمل؟ هل توجد مواد أخرى غير أشباه الموصلات تسمح بتجاوز الحدود الفيزيائية، أو هل توجد وسائل أخرى لتشفير المعلومات أكثر فاعلية من الإلكترونات أو الفوتونات؟ إنها الأسئلة التى يطرحها حاليًا على نفسه عالم الفيزياء، باحثًا بذلك عن "إعادة صياغة"مجال نشاط ضخم ساهم فى خلقه.

فى أصول ثورات المعلومات
والاتصالات

فيزياء الكم للمواد الصلبة

تعتمد القدرة على تخزين ومعالجة ونقل المعلومات أساسًا على مواد أشباه الموصلات. ولا شىء كان يعد هذه المواد لمثل هذا القدر: فخواصها الـ "تقليدية" دون المتوسط، سواء كانت خواص ميكانيكية أو حرارية أو ضوئية أو كهربية. كيف تم التوصل إلى تعريف فئة من المواد، "أشباه الموصلات"، التى هى ليست

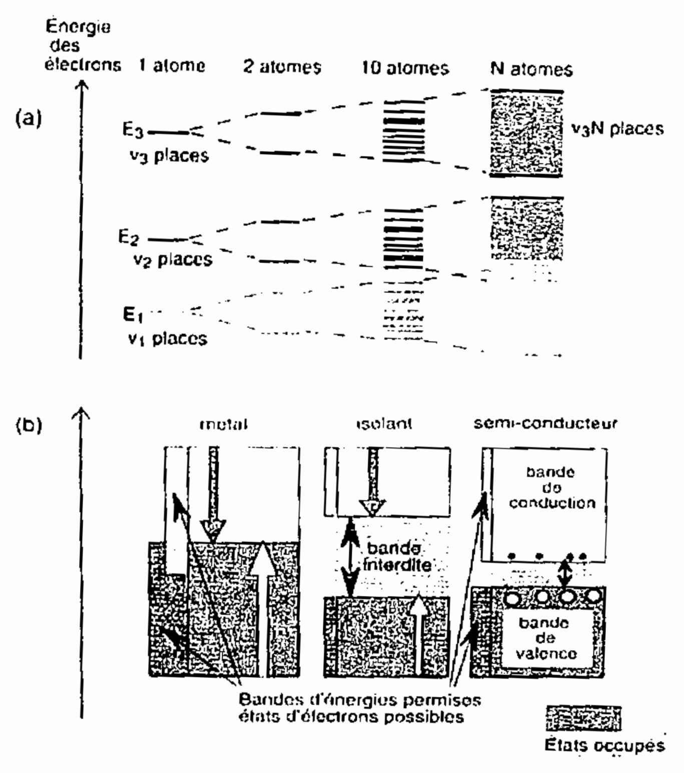
بالموصلات "الجيدة" (فلزية)، ولا بالعوازل "الجيدة"! لطالما خدعت هذه المواد الذين اهتموا بها: على نقيض الفلزات، فإن قدرة هذه المواد على التوصيل تتحسن مع درجة الحرارة، وفضلاً عن ذلك، وعلى نقيض الفلزات هنا أيضًا، فإن قدرتها على التوصيل التى هى دون المتوسط فى الحالة النقية، تتحسن بشكل كبير لو أضيف لها شوائب كيمائية منتقاة ("المواد المضافة").

إن الخواص التوصيلية المتوسطة لأشباه الموصلات، المعتمدة على الكميات الضعيفة من الشحنات المتحركة، هى بالتحديد التى تجعلها "قابلة للتحكم فيها". إن قدرتها على تغيير التوصيلية الكهربية، التى أصبحت "مسيطرًا عليها" بالفهم الفيزيائى للظواهر والإدخال الموضعى لشوائب كيمائية، تسمح بالتحكم فى مرور التيار عن طريق الأقطاب الكهربية. ويكون لدينا إذن تأثيرات التكبير وقطع التيار الخاصة بالترانزستور، التى هى أساس المعالجة الإلكترونية للمعلومات. إن حساسية أشباه الموصلات للدفق الضوئى يجعل منها أيضًا كاشفات للفوتونات فى الاتصالات الضوئية. كما أن الظاهرة العكسية الخاصة بالبث الضوئى تجعل من غير الممكن تفادى أشباه الموصلات كمصدر للفوتونات للاتصالات عن بعد.

لقد شكل فهم هذه الظواهر الانتصار الكبير لتطبيق الميكانيكا الكمية على حركة الإلكترونات فى الجوامد البلّورية: إن حل معادلات الميكانيكا الكمية بالنسبة لإلكترونات تنتشر فى الترتيب الدورى لأيونات بلّورة، قد أوضح أن الطاقات الممكنة للإلكترونات تتوزع فى نطاقات طاقة لديها نوع من الذاكرة لمستويات طاقة الذرات المكونة للبلّورة. إن كل نطاق فى بلّورة يضم عدد N ذرات سيكون لديهvN أماكن للإلكترونات ("حالات كمية" بلغة الميكانيكا الكمية) فى كل نطاق، إذا كانv هو عدد المستويات المسموح بها فى مستوى الذرة عند البداية (الشكل ٢أ). وطبقًا لمواقع نطاقات الطاقة هذه وعدد إلكترونات الذرات، خاصة الإلكترونات الأقل ارتباطا بالنواة (إلكترونات "التكافؤ" التى تؤمن الخواص الكيمائية) سيتم ملء نطاقات الطاقة بالكامل أولاً بالإلكترونات المتاحة، ابتداء من الأقل طاقة

(الشكل٢ب). وإذا كانت الإلكترونات الأخيرة فى نطاق حيث يبقى فى الجوار أماكن شاغرة ذات طاقة أعلى، فإن استخدام مجال كهربى سيمكن من إعطاء دفع وطاقة حركية للإلكترونات. وسيكون هناك توصيلية كهربية فلزية. أما إذا ملأت إلكترونات التكافؤ لمادة ما انطاقات بالكامل، فإنها لا تستطيع كسب طاقة تحت تأثير تعرضها لمجال كهربى. ويكون التعامل إذن مع مادة عازلة. إننا ندرك جيدًا أنه بالنسبة للأنواع الكيميائية المختلفة، التى تكون فيها الاختلافات صغيرة جدًّا بين مستويات طاقة "الذرات المعزولة" عند البداية، سيكون لدينا فى النهاية "مواد صلبة" عازلة أو موصلة، وبالتالى ذات خواص كهربية مختلفة تمامًا.

فى هذا الوصف، تكون أشباه الموصلات فى الواقع مواد عازلة ذات "نطاق محظور" ضعيف بين المستويات الأخيرة المشغولة لنطاق التكافؤ والمستويات الأعلى مباشرة لنطاق الطاقة المسموح التالى، المسمى نطاق التوصيل. ونتيجة لذلك يمكن إثارة بعض الإلكترونات من نطاق التكافؤ لتتجه نحو نطاق التوصيل (شكل ٢ب و٣ د)، تاركين "فجوة" فى نطاق التكافؤ. وكلما ارتفعت درجة الحرارة زاد عدد مثل هذه الإلكترونات والفجوات، اللاتى تؤمن بالتالى توصيلية أكبر. وذلك يفسر غموض قدرة أشباه الموصلات على التوصيل الكهربى التى تزيد مع درجة الحرارة (تنخفض توصيلية الفلزات بسبب الاضطراب الحرارى



الشكل (٢)

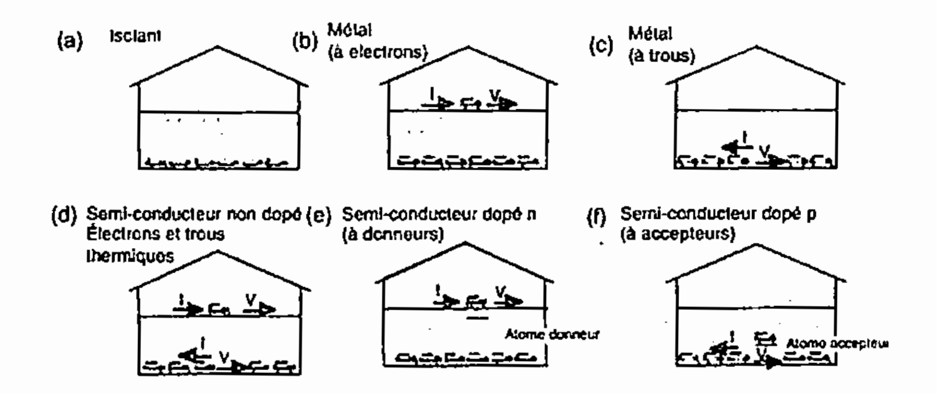
(ا) رسم تخطيطى لتكوين نطاقات الطاقة فى الجوامد ابتدأ من مستويات طاقة الذرات المنفصلة. إن أى مستوى يضم v مكانًا للإلكترونات سيعطى vN مكانًا لعدد N من الذرات.

(ب) ملء الأماكن المتاحة فى نطاقات الطاقة فى الجوامد بواسطة الإلكترونات المتاحة، طبقًا للطاقات المتزايدة. وتبعًا للحالات، تكون الإلكترونات الأخيرة في نطاق غير ممتلئ أو ممتلئ. فى هذه الحالة الأخيرة، لا توجد توصيلية كهربية، بما أن الإلكترونات لا تستطيع كسب سرعة وهو ما كان سيمنحها طاقة حركة، وضرورة شغل مكان طاقة أعلى مباشرة، وهو أمر غير ممكن. يكون لدينا مادة عازلة. فى الحالة الأولى، كما عندما تتراكب النطاقات (حالة النطاقات الناتجة من المستويات ١ و ٢ فى الشكل «ا»)، يمكن أن يكون هناك توصيل كهربى،

فلزى. إن شبه الموصل هو عازل ذو نطاق محظور ضـعيف: بمـا أن المستويات الأخيرة المشغولة قريبة من حيث الطاقة من أول المـستويات الشاغرة، يمكن إثارة الإلكترونات حراريًا من "نطاق التكافؤ" نحو "نطاق التوصيل"، ليسمح بذلك بنوع من التوصيل الكهربى (راجع الشكل ٣).

لأيونات البلّورة الذى يمنع انتشار الإلكترونات، وهى ظاهرة موجودة أيـضًا فـى أشباه الموصلات لكن الزيادة الأكبر بكثير فى عـدد الـشحنات الموصـلة تجعـل "تأثيرها مستترا"). إن للفجوة المتخلفة فى نطاق التكافؤ توصيلية تبدو أنهـا ترجـع إلى شحنة موجبة، لأن الانتقال الظاهرى فى مجال كهربى يحدث فى اتجاه معاكس لانتقال الإلكترونات (شكل رقم ٣ جـ). إن هذا التفسير للتوصيلية الظاهرة لبعض المواد بالـ"فجوة" ذات الشحنة "الموجبة" ظاهريًا فى نطاق طاقة ممتلئ تقريبًا، يحل أحد الألغـاز الكبـرى للجوامـد، لأننـا كنـا نعـرف منـذ ج. ج. طومـسون (J.J.Thomson) أن الشحنات الخفيفة والمتحركة كانت الإلكترونات السالبة!

إن الخاصية الإضافية التى تتمتع بها أشباه الموصلات هى توصيليتها "القابلة للتحكم" عن طريق إدخال شوائب منتقاة: مثل السيليسيوم، وهى مادة أساسية لعلـم الإلكترونيات الميكروية، لديها أربعة إلكترونات تكافؤ. إن إدماج ذرات لها ثلاثـة إلكترونات تكافؤ (مثل البور) أو خمسة إلكترونات تكافؤ (مثل الفوسفور) سـيؤدى إلى نقص أو زيادة للإلكترونات مقارنة للعدد الذى يملأ تمامًا نطاق التكافؤ فى حالة السيليسيوم النقى. ويتجلى ذلك بمـستويات طاقـة "مـسموح بهـا" فـى النطـاق "المحظور"، قرب نطاق التكافؤ أو نطاق التوصيل، ستقوم بإطلاق سراح الفجـوات أو الإلكترونات، بعدد مساو تمامًا لعدد الذرات المضافة التى تم إدخالها (الـشكل ٣ هـ و٣ و). يمكن تخيل بعض الأخطاء التى سببها تأثير إضافة الشوائب الكيميائية:



الشكل (٣)

تمثيل للتوصيلية الكهربية فى الجوامد: (ا): إن الإلكترونات مثل السيارات فى موقف سيارات متعدد الطوابق. إذا كان الطابق ممتلئًا، فلا توجد إمكانية للحركة. (ب): إذا لم يكن ممتلئا يمكن أن تكون هناك حركة. (جـ): الملحوظ أنه إذا كان ممتلئا تقريبا، فإن "فجوة" السيارة تتحرك فى عكس اتجاه السيارات!

إن توصيلية أشباه الموصلات يمكن أن تأتى من إلكترونات وفجوات سببتها الإثارة الحرارية لإلكترون من الطابق الممتلئ الأسفل (تاركًا وراءه فجوة) الشكل (د) أو من شحنات نتجت عن إضافة شوائب كيمائية لديها إلكترون زائد (ذرات عنصر مانح، إضافة من النوع السالب) (الشكل هـ)، أو لديها إلكترون ناقص عن إلكترونات الشبكة (ذرات قابلة، إضافة من النوع الموجب) (الشكل و).

إن التوصيلية "تزيد مع النقاء"، بالنسبة للفلزات، لأن هناك عددا أقل من الأيونات الغريبة لتقاوم مرور التيار. وعلى النقيض، فى حالة أشباه الموصلات، فإن التوصيلية "تزيد مع الشوائب" المضافة! كان باحث ما يعتقد أن لديه مادة نقية لأنها كانت توصل الكهرباء بينما كانت هذه المادة مضافًا إليها شوائب بشكل كبير. وكان

باحث آخر ينقى مادته، متوقعًا أن يراها توصل الكهرباء بشكل أفضل، لكنها كانت تصبح شبه عازلة!

بهذا الفهم لأشباه الموصلات منذ عام ١٩٣٠، والمبنى على الميكانيكا الكمية للجوامد البلّورية، كان لدينا القواعد لإنتاج مكونات إلكترونية. ومع ذلك سيتعين الانتظار حتى عام ١٩٤٧ لكى يرى الترانزستور (transistor) النور.

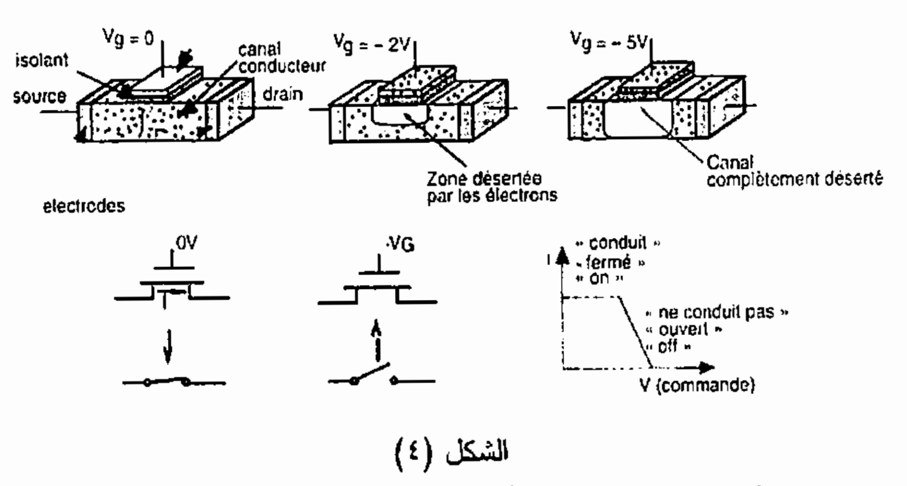
من شبه الموصل إلى الترانزستور
والدائرة المتكاملة

الترانزستور

منذ بداية القرن العشرين كانت هناك فكرة قاطع تيار (interupteur) (مناوب كهربى relais électrique) من مادة صلبة يتم التحكم فيه عن طريق تعريضه لفرق جهد كهربى. ومنذ عام ١٩٢٣ كانت هناك براءات اختراع تصف بشكل صحيح طريقة عمل الترانزستور ذى تأثير المجال (الشكل رقم ٤). غير أن تأثير "الترانزستور" هذا، بمعنى التحكم فى تيار عبر قطعة مادة شبه موصلة بواسطة فرق جهد عند طرفى شبكة تحكم، تطلب أبحاثًا طويلة فى الثلاثينيات والأربعينيات من القرن العشرين، حيث كان الأمر يحتاج إلى إتقان عملية تنقية أشباه الموصلات، وعملية الإضافة المضبوطة للشوائب. كما كان يتعين، وبشكل أساسى أكثر، فهم حدود الطاقة الموجودة فى أشباه الموصلات المضاف إليها الشوائب الكيمائية بشكل غير متجانس، وأيضًا حدود الطاقة الواقعة بين الأسطح الفاصلة فلز/شبه موصل، وكذلك تأثيرات السطح، التى تميل إلى إخفاء كل الظواهر الأخرى.

لقد انطلقت معامل بل، وهيئة التلغراف والهاتف الأمريكية (ATT)، وهى احتكار أمريكى للاتصالات عن بعد، فى مغامرة الترانزستور منذ عام ١٩٣٦، وذلك بجهد بحثى متعمد وصولاً لمثل هذا المناوب الصلب. وأوضح تحليلهما أن

زيادة حركة انتقال الاتصالات الهاتفية ستؤدى إلى تعطل الشبكات بشكل مستمر، نظرًا لحجمها وإمكانية التشغيل الرديئة لأجهزة عكس التيار الكهربى، سواء كانت تعمل بالتناوب الكهرو - ميكانيكى أو بأنابيب مفرغة. كان الأمر يتطلب قواطع تيار يمكن الاعتماد عليها بدرجة عالية، ترتكز على مفهوم فيزيائى جديد. لقد تم اختراع الترانزستور إذن فى شركة اتصالات عن بعد بفضل برنامج بحثى طويل المدى ينطوى على مجازفة عالية، وذلك استجابة لاحتياجاتها. وانطلق بحث أساسى واسع المدى، حيث كان يتعين فهم عدد من الظواهر الجديدة فى فيزياء وكيمياء المواد شبه الموصلة فهمًا كاملاً. وكان لا يمكن أن يتم اختراعه فى شركة للحاسوب لأن ببساطة لم تكن مثل هذه الشركة موجودة فى تلك الفترة.



الشكل (٤)

مبدأ تشغيل الترانزستور ذى تأثير المجال: يتم التحكم فى مرور التيار فى "قناة" موصلة بواسطة مجال كهربى من خلال قطب (الـ "شبكة" الموضوعة أعلى القناة). هنا، تتكون القناة من شبه موصل "مضاف إليه" n شوائب "مانحة" للإلكترونات (راجع الشكل رقم ٣). ويقوم مجال كهربى، ناتج عن وضع جهد كهربى سالب على الشبكة، بإبعاد إلكترونات القناة التى تفرغ تدريجيًا، إلى أن تصبح "خالية"، أى غير موصلة. ومن ثم يكون قد تم إنجاز قاطع تيار "صلب".

إن مجال أجهزة الحاسوب (ordinateur) هو بلا شك أكثر المجالات التي شهدت تقدمًا مذهلاً نتيجة التطور الذي أحدثته أجهزة الترانزستور ثم الدوائر المتكاملة. لم يكن هذا التأثير "متوقعًا" بشكل واضح، إن كبار أرباب الصناعة يخطئون أحيانًا بشكل فظيع: فقد أعلن توماس واطسون (Thomas Watson)، رئيس مجلس إدارة شركة IBM، في عام ١٩٤٣، أن السوق العالمي للحاسوب سيكون خمس وحدات. وفي عام ١٩٧٧، أعلن كين أولسين (Ken Olsen)، رئيس مجلس إدارة شركة Digital، الشركة الرائدة بالنسبة لأجهزة الحاسوب الصغير، أنه لا يرى سببًا يجعل الناس يمتلكون أجهزة حاسوب في منازلهم.

إن التقدم في مجال الإلكترونيات الميكروية هو الذي عمم في أول الأمر أجهزة الحاسوب، ثم جعل الحاسوب الشخصي والخدمات المرتبطة به مثل البريد الإلكتروني والشبكة سهلة المنال. لقد أصبحت هذه الأنواع من التقدم ممكنة نتيجة الخواص الفيزيائية لأجهزة الترانزستور. فهي خواص تتواءم بشكل خاص مع إنجاز وظائف لا غنى عنها في الحاسوب: لنذكر أنه لصنع حاسوب، يجب في آن واحد توفر ذاكرة (لتخزين البرامج والبيانات المدخلة ونتائج الحساب) وقدرة منطق توافيقي (لإجراء حسابات، الشكل رقم ٥). إن الترانزستور يسمح في آن واحد بإنشاء وظيفتي الذاكرة والقدرة المنطقية اللازمتين، لأنه يستطيع أن يعمل كـ"قاطع تيار جيد". وكما يتم إثبات أن قواطع التيار المرتبطة بمقاومات، تسمح بتنفيذ كل عملية منطقية. وذلك انطلاقًا من جبر بوول (Boole)، أي التحليل المنهجي للتوافيق الممكنة للرموز الحسابية المنطقية مثل البوابة "ET" أي "و" في الشكل رقم(٥). وعند ربط ترانزستور يعمل كقاطع تيار بمكثف، فإنه يسمح أيضًا بإنجاز عنصر ذاكرة: إن ذلك هو مبدأ الذاكرات "الدينامية" DRAM[٦٧] (الشكل رقم ٥).

---

(٦٧) ذاكرة توصل عشوائي تحتاج إلى تنشيط على مدد زمنية محددة للاحتفاظ بمحتوياتها. (المترجم)

لماذا يقال إن الخواص الفيزيائية لأجهزة الترانزستور متوائمة بشكل جيد؟ لأنه يمكن تنفيذ وظيفة قاطع التيار هذه بطريقة شبه تامة، أى باستهلاك قليل من الطاقة، وبعزل التيار الذى يتحكم فيه قاطع التيار عن مقود هذا القاطع للتيار: يقال إن "مخرج" المكون لا يؤثر على الـ "مدخل". لذلك، تكون المادة العازلة بين شبكة التحكم والقناة الموصلة (الشكل رقم ٤) حاسمة بالنسبة لنوعية الترانزستور. وتعين الانتظار حتى عام ١٩٦٠ لكى تتوفر أخيرًا مادة عازلة من النوعية المطلوبة، رغم أن تجارب صنع أجهزة ترانزستور ذات "تأثير المجال" كانت قد بدأت منذ عام ١٩٣٠. إن الخاصية الأخرى المهمة جدًا لأجهزة الترانزستور هى أن كل ترانزستور منهم يستطيع التحكم فى عدة أجهزة ترانزستور أخرى، مع جهد يرجع إلى جهد التغذية (راجع جهد "مخرج" البوابة "و" فى الشكل رقم ٥)، وليس إلى جهد التحكم ("صفر" أو "١"). وبالتالى يمكن وضع آلاف المكونات فى تسلسل دون تدهور لإشارة التحكم.

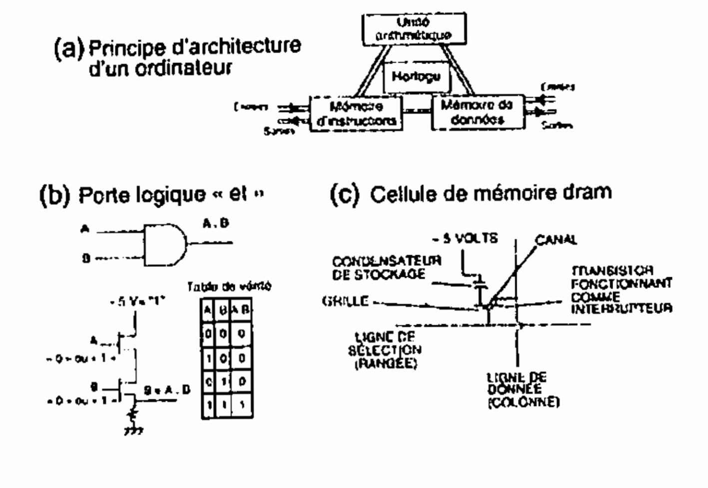
الدائرة المتكاملة

إن الدائرة المتكاملة (circuit intégré) ليست مفهومًا أساسيًا بقدر الترانزستور: لقد نتج اختراعها من تجميع عناصر معروفة سلفا، إن لم يكن قد تم السيطرة عليها، "استجابة لحاجة عملية". إن كيلبى (Kilby)، الحائز على جائزة نوبل عام ٢٠٠٠، وصف الدائرة المتكاملة فى براءة اختراع ومحاضرات، وليس فى مجلة علمية.

لقد حل الترانزستور، منذ اختراعه، محل الأنبوب المفرغ فى الأجهزة الإلكترونية، ويستخدم المهندسون خواصه المدهشة: تصغير الحجم، بفضل تقنيات التصنيع المجهرية، تصميم نظم كبيرة جدًا بفضل الكفاءة الأفضل للمكونات، وصغر حجمها واستهلاكها الضعيف للطاقة بشكل خاص. إن هذا السباق من أجل تصغير الحجم تدفعه احتياجات، مثل احتياجات المراكز الهاتفية الكبيرة، وأجهزة

الحاسوب العملاقة، أو احتياج العسكريين إلى أن يكون تحت تصرفهم إلكترونيـــات "محمولة" من أجل الاتصالات، أو الصواريخ، أو الأقمار الاصطناعية.

من أجل كل هذه التطبيقات، تجرى محاولة تجميع، بشكل مدمج، لأكبر عدد ممكن من المكونات، بواسطة تقنيات تسمى "هجينة": يتم تصنيع كل مكون (مقاومة، صمام ثنائى، مكثف، ترانزستور، محاثة) من مادة مختلفة، ويـــتم توصـــيل هـــذه المكونات، ميكانيكيا وكهربيا، بواسطة مواد أخرى أيضا. غيـــر أن هـــذا التنـــاول الهجين يقابل حصرا مهما. ففى حين زادت كفاءة الترانزستور بشكل كبير، تـــصل كفاءة خيوط اللحام، التى تؤمن الربط الكهربى بين أجهزة الترانزستور هذه، إلـــى حد أقصى. هل يجب الاكتفاء بدوائر تضم فى أحسن الأحوال بـــضع مئـــات مـــن المكونات، لا تتطلب إلا بضعة آلاف من اللحامات؟



الشكل (٥)

(ا) رسم تخطيطى لمبدأ بنية حاسوب، التى تسمح بإجراء العمليات علـــى بيانات وعلى تسلسل الأوامر الواردة من ذاكرة الأمر، بإيقاع الساعة. إن الوظيفتين الضروريتين لعمل الحاسوب هما الذاكرة والمنطق التـــوافيقى (الذى يتيح العمليات الحسابية على "بيتات"، "صفر" و"١"، مـــع تطبيـــق فروق جهد، على التوالى صفر أو -٥ فولت).

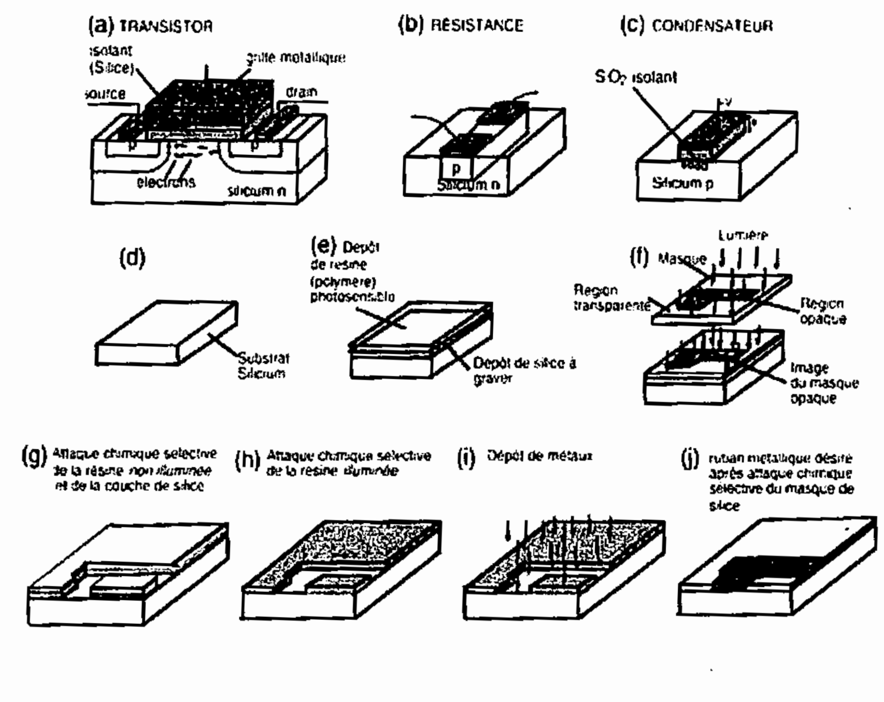
(ب) منطق توافيقى فى أجهزة الحاسوب بفضل ترانزستور يعمل كقاطع تيار: بربط أجهزة الترانزستور والمقاومات، يمكن تكوين دوائر تخلق بوابات منطقية، مثل بوابة "و". لتحقيق ذلك، يجب توفر دائرة تعطى الجهد "١" (هنا –٥ فولت) عندما يكون كل من المدخل A وB "١". فى جميع الحالات الأخرى، يجب أن يكون المخرج المنطقى S "صفراً". لتنفيذ الوظيفة، يكفى توصيل قاطعين للتيار على التوالى، بحيث لا يتركان التيار يمر إلا إذا كانا هما الاثنان فى وضع "موصل". إن كل حالات الدخول والخروج ممثلة بلوحات تسمى "جدول الحقيقة". ويمكن بوضوح رؤية خاصية أساسية للترانزستور: يرتبط جهد المخرج عند طرفى المقاومة مباشرة بجهد التغذية ولا يخضع لفروق جهد التحكم، طالما أن الترنزستور يعمل كقاطع تيار "مثالى"، أى بدون مقاومة داخلية، وهو ما يمثل عملية تقريب جيدة.

(جـ) الذاكرة: يحتفظ فى الذاكرة بمعلومة ما (بيتة) بشحن مكثف (مستوى منطقى "١") أو عدم شحنه (مستوى منطقى "صفر") من خلال ترانزستور. إذا تم عزل المكثف (ترانزستور "مفتوح") تظل المعلومة مختزنة. ويتم تسجيلها بجعل الترانزستور موصلاً (جهد سالب على الشبكة بفضل خط "الاختيار")، ويتم شحن المكثف بالمعلومة "صفر" أو "١" طبقًا للجهد الذى يتم تعريض خط "البيانات" له. وعكسيا، يتم قراءة "بيتة" المعلومة المخزونة بجعل الترانزستور موصلاً، وبقياس إذا كان المكثف مشحونًا عند تتابع الكتابة.إن الذاكرة منظمة فى مساحة كبيرة فى خطوط وأعمدة، وهو ما يسمح بتوصل "عشوائى" للمعلومة. إنها الذاكرة الدينامية DRAM، وهى اقتصادية جدًا بما أنها لا تطلب سوى ترانزستور واحد ومكثف واحد لكل بيتة معلومات يتم تخزينها. يلعب هذا المكثف دور حاسب للأبعاد فى الإلكترونيات الميكروية: إنه يحتوى بشكل قياسى على مليون إلكترون.

من ثم، اقترح بعض أصحاب الرؤى صنع كل المكونات الإلكترونية بمادة واحدة، شبه موصلة، والتى ستستخدم أيضًا كركيزة، ومن هنا جاء مصطلح "أحادى

الحجر" (monolithique) ("حجر واحد"). في مايو ١٩٥٨، ابتكر ج.كيلبي (J.Kilby) طريقة لتنفيذ العناصر المختلفة للدوائر (مقاومات، مكثفات، أجهزة ترانزستور) بمعالجة كيمائية موضعية للسيليسيوم. إن التركيب الكيمائي الرأسي للسيليسيوم (تم إضافة شوائب كيمائية عند نمو بلّورة السيليسيوم، وهي شوائب تنشط التوصيلية)، وعمق المعالجة الكيمائية وهندسة النماذج التي تم معالجتها كيمائيًا تحدد المكونات المختلفة. وتلى هذا العمل بمدة قصيرة ما قام به روبرت نويس (Robert Noyce)، من شركة Fairchild Electronics (سيؤسس بعد ذلك شركة Intel). لقد وصف نويس (Noyce) أيضًا دائرة متكاملة، لكنه بالإضافة إلى ذلك اقترح طريقة التصنيع الصحيحة: أسلوب "بلانار" "planar". إنه استعاد فكرة تم تطويرها عند Bell: استخدم السيليس SiO_2، كقناع تصنيع بسبب خواصه الممتازة في الالتصاق والعزل الكيمائي: يشكل السيليس نوعًا من الشرنقة التي تحمي جزء الدائرة المتكاملة الذي لم تتم معالجته في العملية (راجع فيما يلي الشكل رقم٦).

ورغم أن الدائرة المتكاملة تلبي احتياجات محسوسة جدًّا فإنها لم تفرض نفسها بسهولة. على النقيض! فقد قام أغلب الشركات المنتجة للأنابيب المفرغة بإنتاج أجهزة الترانزستور، لكن القليل منها من قام بالقفزة نحو الدوائر المتكاملة: كان الانقلاب التصوري أكبر بكثير. كانت أجهزة الترانزستور تحل محل الأنابيب "مكون مقابل مكون". كان الأمر بسيطًا ومن البديهي القيام به. وعلى النقيض، كان التكامل أحادي الحجر يصطدم بالعديد من الاعتراضات الوجيهة. أولاً، فهو يستخدم مادة شبه الموصل المكلفة جدًّا لوظائف غير رفيعة، مثل الركيزة. ثم أن التكامل أحادي الحجر سيفرض حلولاً وسطًا فيما يتعلق بهندسة وتركيب المكونات: كان كل مكون أقل كفاءة مما إذا صنع منفصلاً. ومن ناحية أخرى، سيكون المردود الإنتاجي منخفضًا، بما أنه يتعين الحصول دفعة واحدة على مجموعة من المكونات الجيدة. أخيرًا، فبينما كانت الصناعة تحتاج إلى أنواع متعددة من الوظيفية في تجميعات المكونات، التي كان يمكن ابتكارها وتنفيذها استجابة للطلب طبقًا لطريقة التناول الهجين، كان يبدو مستحيلاً تلبية تنوع الاحتياجات بواسطة دوائر متكاملة، ذات وظيفية جامدة غير مرنة.



الشكل (٦)

مبادئ تصنيع عناصر الدوائر المتكاملة: كما تبين الرسوم التخطيطية ترانزستور (ا)، مقاومة (ب)، مكثف (جـ)، وعناصر التوصيل الخاصة بهم. يجب وضع الشوائب المانحة n أو المستقبلة p طبقًا للنماذج الهندسية، وكذلك المواد العازلة والفلزات. لصنع نموذج فلزى على سبيل المثال، يتم موضعيًا إنارة بوليمر حساس للضوء (f) الذى يسمح بخلق "قناع" من السيليس بواسطة معالجات كيمائية انتقائية (f-h)، ويتم من خلال هذا القناع ترسيب الفلز. ويكفى بعد ذلك إجراء معالجة كيمائية انتقائية أخرى لنزع قناع السيليس والحصول فى النهاية على نموذج فلزى (I-j).

ونعرف ما حدث بهذا الخصوص: على العكس، أتاح التكامل اجتياز هذه الحواجز والذهاب إلى أبعد منها بكثير. تستخدم حاليًا أقراص من السيليسيوم قطرها ٣٠ سم، يتم تقطيعها إلى واحدة أو مئات من "الرقائق الإلكترونية"، ويصنع عليها"مئات المليارات" من المكونات من خلال حوالى ثلاثين عملية أساسية! فى الواقع، يستخدم سطح السيليسيوم، المكلف نسبيًا، بفاعلية عالية، بفضل تصغير الحجم الخارق، المستحيل بلوغه فى حالة المكونات المنفصلة (ولو كان ذلك لمجرد أننا لا نستطيع معالجة مكونات صغيرة مثل تلك التى يتم دمجها). ويتم التصنيع بطريقة منضبطة جدًا (نظافة، شروط كيمائية للسطح، إعداد المواد،...) والشىء نفسه ينطبق على مليارات الوصلات الكهربية، التى تكون نتيجة لذلك كلها جيدة! لقد تطلبت هذه النتائج القياسية العديد من الأبحاث وتدريبًا طويلاً لإتقان الطرائق الصناعية. لكن يبدو واضحًا الآن أن التكامل ضاعف الإنتاج والكفاءة بعدة مليارات من الأضعاف، وانخفضت التكلفة بالنسب نفسها: حاليًا، يبلغ ثمن دائرة متكاملة تضم حوالى مليار ترانزستور عشرة دولارات، وهو الثمن نفسه لترانزستور واحد فى الخمسينيات من القرن العشرين.

أما فيما يتعلق بمشكلة الوظيفية المحدودة، فلقد تم حلها على مرحلتين: فى بداية الدوائر المتكاملة، لم يكن ينفذ سوى وظائف عامة بسيطة، البوابات المنطقية (مثل الموضحة فى الشكل رقم ٥)، التى كان تجميعها يتيح تكوين مجموعات وظيفية كبيرة، مثل قواطع التيار الهاتفية أو أجهزة الحاسوب. وكانت هذه الدوائر مدمجة وأيضًا موثوقًا جدًا بأدائها. إنها وهى تضم بضع عشرات من المكونات الأولية، قد أسهمت بشكل قوى فى زيادة إنتاج تصنيع المجموعات، وذلك بتقليل عدد اللحامات المطلوب القيام بها. غير أن الثورة الكبرى تحققت عن طريق المشغل الدقيق: فبدلاً من إنتاج وظيفية عن طريق تجميع عناصر مادية، يتم برمجة هذه الوظيفية. إن المشغل الدقيق متعدد الوظائف، ومتعدد التطبيقات. بالطبع، مثل هذا النظام ليس بالأمثل فى استخدام المكونات الإلكترونية، لكن بما أن تكلفة هذه المكونات انهارت، لم يعد لذلك أهمية.

مبادئ الصنع

إن أسلوب الصنع عن طريق الطباعة الحجرية (lithographie) يشبه أسلوب الطباعة على الورق (الشكل رقم ٦): تبدأ العملية برسم العناصر المختلفة ذات الطبيعة الواحدة التي يمكن صنعها خلال عملية واحدة. ثم يتم إسقاط هذه الصورة بصريًا على مادة حساسة للضوء موضوعة على الرقيقة (قطعة السيليسيوم الحاملة للدائرة المتكاملة). ويتم بعد ذلك معالجة هذه المادة كيميائيًا بطريقة انتقائية لتحويل الصورة الأصلية إلى مادة ذات بنية ذاتية محددة. وتقوم هذه المادة بتحديد مناطق سطح الرقيقة حيث سيتم إجراء عملية الصنع المطلوبة، فعلى سبيل المثال، راسب محدد الموضع من فلز في المكان الذي تم نزع منه المادة الحساسة للضوء. وبالتالي نكون قد حولنا صورة من الوظيفة " الواصلة" بين مكونات رقيقة ما، إلى مجموعة من الموصلات على الرقيقة. وبالطريقة نفسها يتم تنفيذ كل عمليات إدخال المواد ذات البنية الذاتية المحددة الضرورية للرقيقة، مثل ترسيب مواد عازلة، والإدخال المحدد الموضع لشوائب كيميائية في شبه الموصل، إلخ.

إذن، أصبح صنع المكثفات وأجهزة الترانزستور والروابط الخاصة بالدوائر المتكاملة سلسلة متوالية من العمليات المتكررة: صنع طبقة على رقيقة السيليسيوم، ونقل صورة ثم إظهار هذه الصورة بأسلوب كيميائي. ويتطابق مع كل واحدة من هذه الصور النقل المكاني لعناصر مكونة للدوائر المتكاملة: مواد عازلة، إضافة شوائب كيميائية، فلزات تلامس وفلزات الربط بين الدوائر، إلخ. حاليًا، يتضمن صنع مكون شبه موصل ٢٥ مرحلة رئيسية (متطابقة مع كم الأقنعة، وصور النماذج التي يجب نقلها على المكون)، تتحلل إلى ٦٠٠ مرحلة أولية يجب تنفيذها بإتقان تام.

قوانين تصغير الحجم

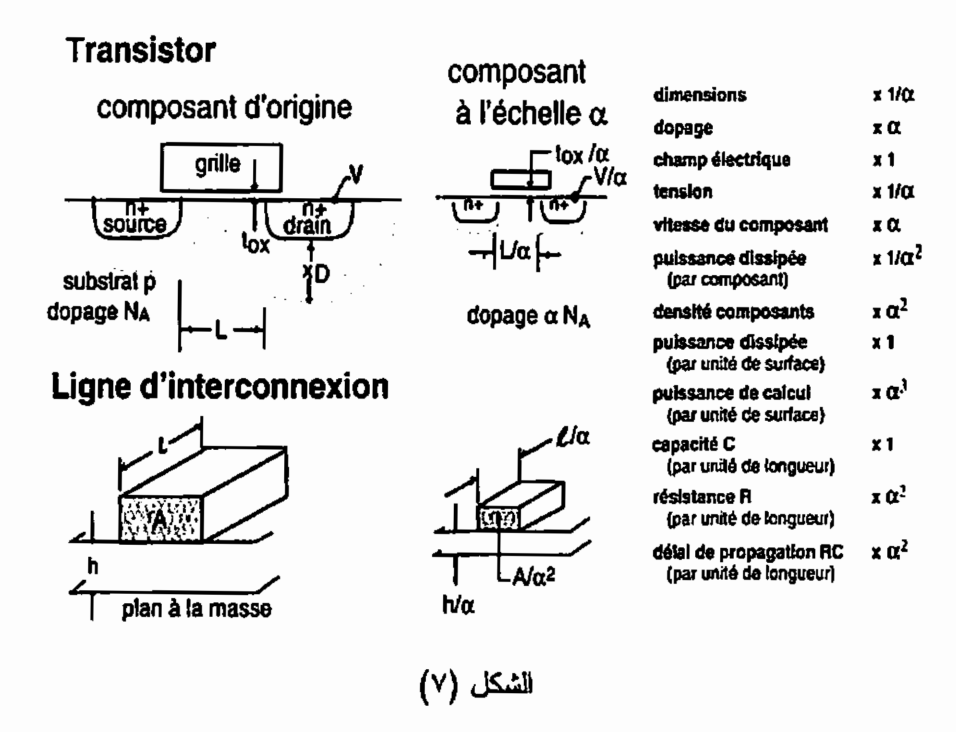
لا يجب أن نتصور أن تقدم عملية تصغير الحجم كانت بدون تصادمات: لقد تميز تاريخ أشباه الموصلات بتتالى الأزمات. ترجع الأزمة الأولى إلى عام ١٩٦٢! وكانت مرتبطة بالقيود التكنولوجية التى تعرقل تطور الطباعة الحجرية. وفى السبعينيات من القرن العشرين، كان سبب القلق أخطاء عمل الذاكرة الراجع إلى الأشعة الكونية الممتصة فى دوائر الذاكرة. وفى عام ١٩٨٢، كان هناك موضوع آخر للأزمة: بدأ الربط بين عناصر الدوائر يطرح بدوره مشكلة لأنه من الصعب صنع روابط بحجم ميكرونى دون عيوب.

يوجد حاليًا أزمات أقل وذلك لسببين: من ناحية، نعرف قوانين المقياس، التى تصف سلوك المكونات عندما ننقص كل أبعادها بعامل واحد. ومن ناحية أخرى، يعمل رجال الصناعة حاليًا فى توافق، فى سياق "تعاونى تنافسى"، أى بأن يتعاونوا بينما يظلون متنافسين. ويأتى هذا السلوك الجديد، المميز جدًّا للاقتصاد الجديد، من إدراكهم أنهم جميعًا رابحون إذا حددوا معًا كيف يجب على الصناعة أن تتقدم وذلك بوضع أهداف مشتركة، "خريطة طريق تكنولوجية". إن وضع كل الموارد على أهداف تقنية مشتركة، يسمح بالتقدم بسرعة أكبر ويفتح أسواقًا جديدة.

قوانين المقياس
lois d'échelle

تطبق قوانين المقياس عندما تخفض كل الأبعاد بعامل α (الشكل رقم ٧). تكون المكونات عندئذ أسرع لأن المسافات التى تقطعها الإلكترونات تكون أصغر. وتزيد الكثافة السطحية للمكونات نظرًا لتناقص حجمها، لكن بما أن كل مكون يستهلك أقل، فإن القدرة المبددة لكل وحدة سطح تظل ثابتة، وذلك هو المهم. ومن ثم تضاعفت، إجمالاً، القدرة المنطقية بعامل ١٠٠٠ مقابل خفض فى الحجم بعامل ١٠.

حتى لو كانت فيزياء المكون تشير، عبر قوانين المقياس، إلـــى أن عمليـــة تصغير الحجم ممكنة، فإن السباق نحو تنفيذ دوائر أكثر كثافة بشكل متزايـــد لـــيس أقل صعوبة: إن الطباعة الحجرية للنماذج الأصغر المطلوب نقلها على رقيقة تمثل حدودًا تكنولوجية تتزحزح. إن خطوط الإنتاج تنتقـــل حاليًـــا إلـــى معيـــار ٠,١٨ ميكرون. إننا قريبون جدًا من الحدود الفيزيائية لمـــا يمكـــن أن يقـــوم بـــه علـــم البصريات، حتى إذا كانت البصريات الأكثر فاعليـــة فـــى الوقـــت الـــراهن هـــى المستخدمة فى الإلكترونيات الميكروية. إن أحد العوائق التكنولوجيـــة هـــو ســـمك المادة العازلة من السيليس الواقعة تحت الشبكة: حسبما تشير قوانين المقياس، يجب تقليل سمكها لمتابعة عملية تصغير الحجم (الشكل رقم ٧). يقدر هذا السمك حاليًـــا بـــ ٤٠ أنجستروم (١٣ طبقة ذرية). أما بالنسبة للسمك الأقل، فيلاحظ تقلبات سمك غير مقبولة (طبقة ذرية على الأقل) وفى الوقت نفسه وظيفة عازلة غير كافية، لأن الإلكترونات تستطيع اجتياز حاجز الجهد، الذى تشكله السيليس، بواســـطة التـــأثير النفقى، وهو تأثير كمى صرف. ونتيجة لذلك، هناك حاليًا مجال استكـــشاف نـــشط جدًا موجه إلى البحث عن مواد عازلة أفضل من السيليس (تكون فى هـــذه الحالـــة ذات نفاذية كهربية عازلة أعلى).



الشكل (٧)

قوانين المقياس فى الإلكترونيات الميكروية: كيف تتغير المقادير المختلفة لدائرة إلكترونية عندما نقلل كل الأبعاد بعاملα، مع الالتزام بالإبقاء على سرعة الإلكترونات ثابتة، أى فى ظل مجال كهربى ثابت؟ تجدر الإشارة إلى أن تصغير الأبعاد بمعدل عشرة (α =١٠) يؤدى إلى زيادة القدرة الحسابية بمعدل ألف، وزيادة سرعة المكون الفردى بمعدل ١٠، لكن الرقيقة ككل تقل سرعتها إذا لم يتم حل مشكلة زيادة مهل انتشار RC الخاص بموصلات الربط (يُستخدم لذلك تناولان: من ناحية، يتم تكوين نظام تسلسلى للموصلات على الرقيقة: تحتفظ الأكثر طولاً بقسم مستقل عن قانون المقياس. ومن ناحية أخرى، يتم استخدام مواد ذات توصيلية كهربية متزايدة الارتفاع.

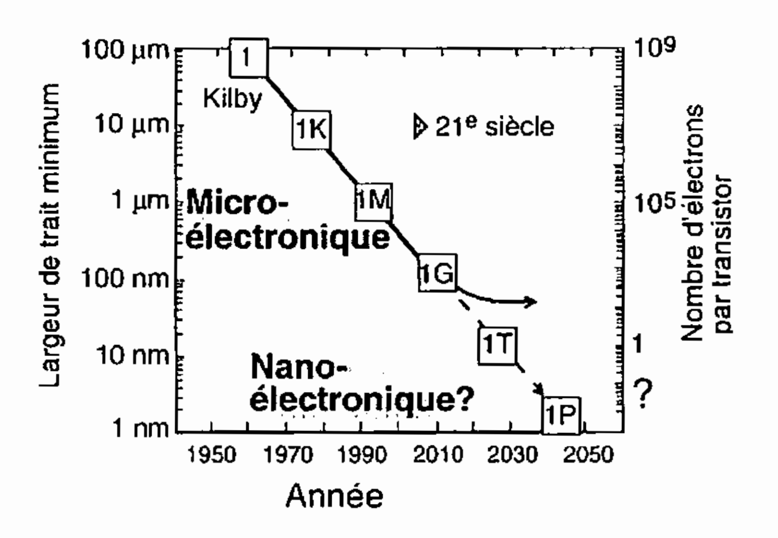
الإجماع الصناعى: "خريطة الطريق"

فى الوقت الراهن (منتصف عام ٢٠٠٠)، يحتوى مشغل دقيق على ٤٢ مليون ترانزستور (بنتيوم ٤)، والذاكرات التى يجرى إنتاجها تضم ٢٥٦ ميجا بيتة (الشكل رقم١)، منفذة بمعيار ٠,١٨ ميكرون. ومع الأخذ فى الاعتبار التقدم الذى تحقق، فإن المكون الإلكترونى الفردى (المشغل الدقيق) قد لحق بأجهزة الحاسوب الكبيرة، مما قلب الصناعة الإلكترونية رأسًا على عقب. تجدر الإشارة مثلاً إلى أن الحاسوب الشخصى منذ بداية التسعينيات من القرن العشرين كان له القدرة الحسابية للحاسوب الفائق CDC 6 600 لعام ١٩٦٥، والذى كان محظورًا تصديره للحد من انتشاره، وهو ما سبب بعض الاحتكاكات بين الفرنسيين والأمريكيين، وكان أحد الأسباب وراء وضع خطط الحسابات الفرنسية.

إلى أين نذهب وبأى إيقاع؟ إن الإجماع الصناعى يعبر عن نفسه بـ"خريطة الطريق التكنولوجية الدولية لأشباه الموصلات"، (راجع: http://public.itrs.net/Files/1999_SIA_Roadmap/Home.htm). إن "خريطة الطريق" تحدد كل عامين التطور التقنى للمجال، والاتجاهات التى يتعين على العاملين فيه الالتزام بها. تقدم النسخة الأخيرة، التى نشرت نهاية عام ١٩٩٩، الرؤية حتى عام ٢٠١٤. لا حاجة للقول إنه إذا كانت هناك حلول منظورة على المدى القصير بالنسبة لأغلب الاحتياجات، فعلى المدى الطويل يوجد شك كبير، سواء بالنسبة لعمل الدوائر وتكنولوجيات التصنيع، ومعدلات الإنتاج والتكاليف. إلا أنه من المتوقع أن يظل قانون مور (Moore) التجريبى (نسبة إلى اسم أحد مؤسسى شركةIntel، الذى أعلنه منذ عام ١٩٦٥) والذى ينص على أن عدد أجهزة الترانزستور فى الدوائر المتكاملة يتضاعف كل ١٨ شهرًا، صحيحًا لمدة خمسة عشر عامًا تقريبًا. خلال هذه الفترة، يبقى التقدم ملحوظًا طالما أننا سنبدأ فى عام ٢٠١٤ فى الإنتاج بالجملة لذاكرات سعتها ٢٥٦ جيجا بيتة ومشغلات دقيقة تضم ٤,٤ مليار ترانزستور وذلك مع عرض خطوط ٣٥ نانو متر!

حدود عملية تصغير الحجم

فى لحظة ما، يجب أن يتوقف هذا السباق نحو تـصغير الحجـم: ستـصبح الأبعاد صغيرة جدًا بحيث لن يكون بإمكان الترانزستور العمل. إن هـذه الحـدود الفيزيائية لعملية تصغير الحجم تتغير مع الوقت، بسبب التقدم فى مجال المكونـات، الذى يسمح بالتحرر من بعض الحدود، بتغيير بنية أجهزة الترانزستور مثلاً. غيـر أن الحد الأدنى لحجم شبكة أى ترانزستور يقدر بـ ٢٠٠ أنجستروم (واحـد علـى خمسين من الميكرون). عند هذا الحجم تظهر مجموعة من الحدود بالنسبة للمعـالم (بارامترات) المختلفة، وتصبح قوانين المقياس غير منطبقة. إن مثل هـذه الأبعـاد سيتم بلوغها حوالى ٢٠٢٠ – ٢٠٢٥. هل يعنى ذلك أن تصغير الحجم لن يـستمر بعد هذا التاريخ؟ لا، لكن يمكن التوجه نحو طرائق أخرى للتناول. يعمل الـبعض بالفعل على تصورات لمكونات تعمل بإلكترون واحد، بما أن استكمال قانون مـور (Moore) يوضح أن ذلك سيكون مسئولية المكونات عند حوالى ٢٠٢٠ – ٢٠٢٥ (الشكل رقم ٨). بالطبع، لن يتعلق الأمر بأجهزة ترانزستور بالمعنى الذى نفهمـه حاليًا، حتى لو كان السبب الوحيد أن المكون لن يستطيع تغذية العديد من المكونات الأخرى: كيف يمكن اقتسام الإلكترون الواحد بين هذه المكونات؟ سيـستمر التقـدم بدون شك، وبطريقة أو أخرى، سنتمكن حوالى عام ٢٠٣٠ من شراء المكافئ للمخ البـشرى (مـن حيـث القـدرة الحـسابية) مقابـل ألـف دولار! (http://www.transhumanist.com/volume1/moravec.htm).



الشكل (٨)

التطورات المتوقعة لعرض الخط، وعدد العناصر الفعالة لكل رقيقة إلكترونية، وعدد الإلكترونات لكل ترانزستور، مع افتراض أننا نستمر فى التقدم طبقًا لإيقاع قانون Moore (مضاعفة عدد المكونات بكل رقيقة كل ١٨ شهرًا). ستظهر فى الفترة من ٢٠٢٠-٢٠٢٥، مشكلات تصورية، بينما لن يحوى الترانزستور سوى إلكترونا واحدا.

بعيدًا عن السيليسيوم وأكثر منه

لقد فهمنا أن السيليسيوم (silicium) فرض نفسه كمادة ممتازة فى الإلكترونيات الميكروية، بسبب خواصه العديدة: المقاومة الميكانيكية الجيدة، والنقاء المفرط، وإمكانية وضع قناع من السيليس عليه أثناء عمليات التصنيع، وخواص العزل الكهربى الممتازة للسيليس، إلخ.

غير أن علم إلكترونيات أشباه الموصلات لا يعتمد بالكامل على السيليسيوم. ويجب التمييز بين تطورات السيليسيوم، واستخدام مواد أخرى تحل محله فى بعض الوظائف التى ينجزها بشكل غير كامل، والحلول التى تسمح بتجاوز الحدود الفيزيائية لعلم إلكترونيات أشباه الموصلات كما نعرفها حاليًا.

تطور السيليسيوم

يرتكز التطور على الذهاب أبعد قليلاً من حدود السيليسيوم، وذلك بجعل تركيبه فى شكل طبقات رقيقة مع مواد أخرى، ومثال على ذلك الـSOI (سيليسيوم على عازل، والعازل هنا هو السيليس). إن استخدام طبقة رقيقة من السيليسيوم (جزء من الميكرون) ترتكز على عازل، السيليس، يسمح بالحصول على تأثير إخلاء القناة (كما وصف فى الشكل رقم ٤) بشكل أكثر وضوحًا. وبجهد أقل، عن لو استخدم السيليسيوم السميك المعتاد. ويتم بذلك تحقيق كسب فى السرعة والاستهلاك، كما يجعل عملية تصغير الحجم أسهل نتيجة البعد الرأسى الصغير. ويرتبط تناول آخر باستخدام سبيكة سيليسيوم – جرمانيوم فى القناة، حيث تكون الإلكترونات فى السبيكة أكثر حركية قليلاً. ويتم بالتالى كسب عامل بحدود ٣٠ ٪ بالنسبة لسرعة الدوائر.

استخدام أشباه موصلات جديدة:

إن فكرة استخدام أشباه موصلات أخرى أتت من الفيزياء الأساسية لأشباه الموصلات. فى الواقع، لقد تم إدراك أن الإلكترونات تستطيع الانتقال بسرعة أكبر فى زرنخيد الجاليوم عنها فى السيليسيوم. وبالتالى تكون ذات كفاءة عالية جدًا بالنسبة للدوائر ذات السرعة الفائقة، مثل دوائر الاتصالات عن بعد. إن زرنخيد الجاليوم نفسه لديه خواص أفضل بكثير من السيليسيوم فيما يتعلق بالانبعاث الضوئى. إذا تم حقنه بأزواج إلكترون – فجوة بواسطة وصلات كهربية، نحصل على انبعاث فوتون، عن طريق إعادة توليف إلكترون مع فجوة، ومن ثم يتم تحويل مباشر للكهرباء إلى ضوء. وتستخدم هذه الظاهرة كثيرًا فى المصابيح المسماة صمامات ثنائية باعثة للضوء (DEL). ويتم إنتاج حوالى خمسين مليار من هذه المصابيح فى العالم سنويًا. ومع التقدم الذى تحقق مؤخرًا من أجل توليد ضوء أخضر بفضل شبه الموصل نيتريد الجاليوم، يعتقد بإمكانية استبدال المصابيح التقليدية بـ DEL ذات المردود العالى والعمر الأطول. إن المجال الآخر ذا

التطبيقات المهمة جدًا هو مجال ليزر أشباه الموصلات، المدمج جدًا، فسطحه النموذجي ٣٠٠ × ١٠٠ ميكرون، وتستخدم هذه الأنواع من الليزر في القارئات البصرية (الإسطوانات المدمجة، الـ DVD والسي دي روم CD-ROM)، وطابعات الليزر، والاتصالات عن بعد.

المفاهيم الجديدة لمعالجة المعلومات

على المدى الطويل، من الممكن، بل ويجب، البدء في تصور بدائل لنموذج السيليسيوم النمطي للدوائر والبنية الحالية للمشغلات الدقيقة وأجهزة الحاسوب، وذلك بالعثور سواء على مواد وتركيبات تحل محل السيليسيوم (إلكترونيات جزيئية مثلاً)، أو مبادئ فيزيائية جديدة لمعالجة المعلومات (حاسوب كمي).

ترتكز إحدى أولى طرائق التناول على العمل على الحدود الحالية:إن توصيل وربط الرقائق بعضها ببعض تصبح عاملاً مقيدًا: حاليًا، يتطلب إدخال أو إخراج البيانات من مشغل دقيق عدة مئات من الروابط الكهربية، وغدًا سيتطلب ذلك عدة آلاف. فبينما الوصلات على الرقيقة الإلكترونية سريعة جدًا واستهلاكها للطاقة معقول، تكون الوصلات الخارجة من الرقيقة أبطأ بكثير (عشر مرات نموذجيًا) وتحتاج إلى تيارات قوية لتغذية خطوط الاتصال البينية التي تكون أحيانًا طويلة، وبالتالي يجري التفكير بشكل متزايد في نقل البيانات ضوئيًا، في تكوينات تعتمد على الوصلات البينية الضوئية.

يقضي تناول آخر بإعادة النظر في معمار الحاسوب. على سبيل المثال، يتم استخدام أداء المكونات الفردية بشكل سيئ: ففي حين يستهلك مكون ما طاقة بحدود فيمتو جول لاستبدال حالة منطقية بأخرى، يستخدم مشغل دقيق ممتاز الأداء حوالي ١٠ ملايين مرة هذه الطاقة للقيام بعملية واحدة (يستهلك مشغل دقيق يقوم بألف مليون عملية في الثانية، ١٠ وات). وبالطبع، تتضمن عملية معقدة على ٦٤ بيتة في آن واحد العديد من العمليات الأولية (بحث في الذاكرة، عمليات حسابية، عودة

إلى الذاكرة) لكن هناك عدم فاعلية بالنسبة للمجموع. لذلك يتم التوجه نحو بنى جديدة، تقليدية لكن متخصصة (مجموعات من البوابات المنطقية مخصصة لمهمة واحدة)، أو بنى جديدة تمامًا، مثل البنى العصبية، محاكاة بيولوجية للمخ. في الواقع، توجد في الطبيعة نظم أخرى تقوم بعمليات منطقية، أكثر فاعلية من مكوناتنا الإلكترونية: لمخ النحلة مثلاً قدرة حسابية قدرت بـ ١٠×١٠[١٢] عملية منطقية أولية في الثانية؛ أي واحد على ألف من الفيمتو جول لكل عملية في الثانية (KT٢٥٠)، مقابل قدرة مبددة تساوي ١٠ ميكرووات. إن تناسخ جزئ - قاعدة للدنا (A D N) ("بيتة" (bit) المعلومات في البيولوجيا) لا يتطلب سوى KT٢٠، لعملية معقدة نسبيًا تتضمن البحث عن القاعدة المطلوب نسخها، والنسخ، ثم وضعها في الذاكرة، والسيطرة على العملية وعدم انعكاسيتها (نريد نسخ الدنا "A D N" وألا يقوم هو بنسخ الرنا "A R N"). إن معالجة المعلومات بواسطة جزيئات دنا (A D N) هي طريق يجري استكشافه حاليًا كبديل للسيليسيوم.

يمكن أيضًا التفكير في نظم فيزيائية جديدة تسمح بوظيفية مماثلة لأشباه الموصلات. إن التناول الأكثر طموحًا هو الخاص بالإلكترونيات الجزيئية. ويتعلق الأمر بتحقيق مجموعة من الوظائف تسمح بمعالجة بيتات معلومات، مشفرة بحزم من الشحنات الكهربية كما في حالة السيليسيوم، بواسطة جزيئات عضوية. إن المميزات هي بالطبع الإدماجية (الحجم الضروري لترانزستور أو بوابة منطقية هو الجزئ) وسهولة الصنع (إن انتقائية التوليف العضوي هي التي توفر تصنيعًا لا عيب فيه بالمقياس الذري). لكن عوائق هذه الفكرة الجذابة ضخمة: لم يتوفر بعد حقًا جزيئات تظهر تأثير ترانزستور، باستثناء الجزيئات التي ترتكز على أنابيب كربونية متناهية الصغر. إن الوظيفية المثبتة هي أقرب لوظيفية الصمام الثنائي. غير أن تنفيذ دوائر منطقية معقدة من صمامات ثنائية يطرح صعوبات أساسية جدًا، تم الاصطدام بها عدة مرات خلال تاريخ الإلكترونيات الميكروية، رغم أن الصمامات الثنائية، الأبسط من الترانزستور والمتناهية السرعة، قد تبدو مكونًا فعالاً أفضل. حتى شوكلي (Shockley) خدع بها، عندما أسس شركته على نوع

جديد من الصمامات الثنائية. لقد أفلس، أما معاونوه الذين لـم يتبعـوه فـى هـذا الطريق، بقيادة نويس (Noyce)، مفضلين الترانزستور، أسسوا على التوالى شركة Fairchild، ثم Intel، وحققوا النجاح المعـروف. واسـتعرض روبـرت كيـس (Robert Keyes)، أحد رواد الإلكترونيات الميكروية، مرات عديدة، المزايا الدقيقة للترانزستور، التى تؤدى إلى بنى قوية وتسلسلية، كما ذكر سابقًا.

وينطلق تناول آخر من نظرية المعلومات بشكل عام، ومن الحدود الفيزيائية لمعالجة المعلومات بشكل خاص. إن قضية الحد الأدنى من الطاقة اللازمة لمعالجة المعلومة (طاقة المعلومة ذاتها) نالت اهتمامًا كبيرًا من قبـل الفيزيـائيين وعلمـاء المعلوماتية. تؤدى نظرية المعلومات الخاصة بشانون (Shannon) إلى حـد أدنـى للطاقة لكل بيتة معلومات يقدر بـ KTLog2 (حيث KT هو كم الطاقة الحرارية). إن المكون الحالى، المبدد لواحد فيمتوجول، بعيد جدًا عن هذا الحد، بعامـل ٢٠٠ ألف. فى الواقع يمكن إثبات أن معالجة المعلومة لا تتطلب تبديـدًا للطاقـة إذا مـا أجريت بطريقة قابلة للانعكاس، بمفهوم الديناميكا الحراريـة. لقـد حفـزت هـذه الاعتبارات علماء الفيزياء بحيث تسألوا كيف يمكن تشفير المعلومة بـشكل أكثـر فاعلية بطريقة غير الشحنة الكهربية للإلكترونات، من أجل معالجتها بشكل أفضل. أتت الإجابة فى الثمانينيات من القرن العشرين، مع اقتراح الحاسوب الكمى، الـذى تم توضيح مبادئه فى نهاية عقد التسعينيات. يتم حمل المعلومة بواسطة دالة موجـة لنظام كمى، حيث الإحداثيات الكمية هى التى تمثل الـــ "صـفر" والـــ "واحـد" الخاصين بالمنطق. إن مجموعة N من الذرات (أو الإلكترونـات أو الجزيئـات... ... إن الطبيعة الفيزيائية للنظام الكمى ليست مهمة) المتفاعلة كميًا فيما بينها (إنهـا متشابكة بتعبير الميكانيكا الكمية) يمكنها أن تمتلك 2^N مكونة، إذن بيتات تقليديـة! فبالنسبة لعشرين ذرة فقط، يمثل ذلك مليون بيتة تقليدية! وبإجراء عمليـات كميـة على بيتات– الكم هذه (بيتات كم – بيتات كمية)، يتم معالجة 2^N بيتة تقليدية مـرة واحدة، ومن ثم تنفذ عملية معقدة جدًا فى معالجة واحدة للبيتة–الكمية. ويسمى ذلك التوازى الكمى الذى يؤدى إلى فاعلية غير عادية للحاسوب المعتمد على البيتـات–

الكمية. وبما أن العمليات الكمية لا تكون فعالة إلا بالنسبة لفئات معينة من المشكلات، فإن الأمر يتطلب وجود مشكلات يحتاج حلها إلى استخدام نتائج معالجات البيتات–الكمية. منذ عدة سنوات، تمكن العلماء من تحديد بعض المشكلات الرياضية الكبرى، مثل تحليل أرقام كبيرة إلى حاصل ضرب أعداد أولية، وهى مشكلة لا يمكن تقريبًا حلها بواسطة أجهزة الحاسوب التقليدية، حتى مع الأخذ فى الاعتبار التقدم فى المستقبل، فى حين يمكن حلها بسهولة بواسطة حاسوب كمى. لكن المشكلة تكمن فى تصنيعه. إنه يتطلب بيتات – كمية ترتكز على بضع مئات من العناصر. لقد تم التوصل إلى خمسة عناصر، وتتزايد الصعوبات بسرعة كبيرة جدًا مع عدد العناصر. المشكلة الأخرى هى حساسية البيتات – الكمية الكبيرة جدًا لأى اضطراب أو تشويش، فهو يجعلها تفقد كل ذاكرة.

لكن ذلك لا يجعل الحاسوب الكمى أقل سحرًا لاشتماله على ميكانيكا كمية قصوى، وتراكب وظائف الموجة، وما ينطوى عليه من عودة إلى المنابع، من أجل معلوماتية نابعة من أشباه الموصلات، التى هى نفسها ولدت من الميكانيكا الكمية لسنوات الثلاثينيات من القرن العشرين.

المراجع:

Histoire et développement des semi-conducteurs et de la micro-électronique

Grâce au cinquantenaire du transistor en 1997, de nombreux livres et revues se sont ajoutés à une liste déjà importante d'ouvrages souvent excellents. Quelques titres :

– Rodgers (E.) et Larsen (J.), *La Fièvre de Silicon Valley*, Londreys, 1985.

– Riordan (M.) et Hoddeson (L.), *Crystal Fire*, Norton, 1997 (ouvrage très complet sur l'histoire du transistor) ; « The Moses of Silicon Valley », *Physics Today*, décembre 1997, p. 42.

– Rosencher (E.), *La Puce et l'ordinateur*, Dominos Flammarion, 1995 (excellent ouvrage simple).

– Dauvin (J.-Ph.), Olliver (J.) et Coulon (D.), *Les composants électroniques et leur industrie*, « Que sais-je ? », PUF, 1995 (ouvrage remarquable sur l'économie de la micro-électronique).

– « Fiftieth anniversary of the transistor », *Numéro spécial de Proceedings IEEE*, vol. 86, n° 1, January 1998, (nombreux articles originaux, dont ceux de Brattain et Bardeen, ainsi que celui où Moore énonce sa fameuse « loi », ainsi que quelques perspectives historiques).

– « Les défis de la micro-électronique », *Numéro spécial des Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, série IV tome 1, n° 7, septembre 2000.

– « The future of micro-electronics », *Numéro Spécial Nature*, vol. 406, August 31st 2000, p. 1021-1054.

– « The Transistor », *Numéro spécial de Bell Labs Technical Journal*, vol. 2, n° 4, Autumn 1997, (accessible en ligne : http://www.lucent.com/minds/techjournal/common/arc_issues.html).

– *Scientific American*, Microelectronics, september 1977, trad. fr., *La Micro-électronique*, Belin, 1980 (ouvrage ancien constituant cependant une remarquable introduction aux principes de la micro-électronique).

– Chavel (P.) et de Beaucoudray (N.) (éds.), *Technologies futures de l'ordinateur*, Éditions Frontière, 1993.

Quelques livres et articles plus spécialisés, mais élémentaires :

– Keyes (R.W.), « Physics of Digital Devices », *Rev. Mod. Phys.*, 61, p. 279, (1989) ; *Physics of VLSI systems*, Addison-Wesley, Reading 1985 ; *Physical Limits in Information Processing* dans « Advances in Electron Physics », vol. 70, Academic, New York, 1988 ; *Limits and Alternatives in Electronic Information Processing* dans « Technologies Matérielles Futures de l'ordinateur », *loc. cit.*, « Limits and Challenges in microelectronics », *Contemporary Physics*, vol. 32, p. 403, 1991 ; « L'avenir du transistor », *Pour la science*, août 1993, p. 60.

– Lloyd (S.), « Les ordinateurs quantiques », *Pour la Science*, décembre 1995, p. 44.

– Bennett (C.) et Landauer (R.), « Les limites physiques du calcul », *Pour la science*, septembre 1995, p. 18.

– Reed (M.) et Tour (J.), « Les ordinateurs moléculaires », *Pour la science*, août 2000, p. 78.

– Sur les alternatives au silicium, on pourra consulter le numéro de mars-avril 2000 de *Technology Review*, accessible sur le web http://www.techreview.com/past.htm (donne aussi de nombreux liens).

شكر

أود شكر ج. ف. داروين (J.Ph.Darwin)، س. أوتاريانى (C.Ottariani)، د.تومـــاس (D.Thomas) مــــن ST Microelectronics وج. ب. نـــوبلان (J.P.Noblanc) من CEA industries،و م. راتييـــه (M.Ratier) و ف. شـــابيت (F.Chaput) و م. بـــلاب (Plapp M.) مـــن Ecole Polytechnique للمـــساعدة والنصائح التى قدموها فى إعداد هذه المحاضرة.

الخواص الكهربية للمادة[٦٨]

بقلم: جاك ليوينير

Jacques LEWINER

ترجمة: لبنى الريدى

الملاحظة

بمقدور كل منا ملاحظة أن بعض المواد تنقل الكهرباء أو تتركها تمر، بينما تعمل مواد أخرى على وقف مرورها. فالأسلاك الكهربية التـــى تغـــذى الأجهـــزة العديدة التى نستخدمها تشتمل على جزء معدنى موصل للكهرباء، وغلاف خارجى عازل لا يتركها تمر. إن المادة تتكون من ذرات تنطوى على نقاط مشتركة كثيرة: نواة تدور حولها إلكترونات. فى هذه الظروف لماذا تكون بعض المـــواد عازلـــة وتمنع مرور التيار الكهربى، بينما تترك مواد أخرى، الموصـــلات، الإلكترونـــات الحرة تنتقل خلالها؟

لماذا يقرر إلكترون مرتبط أصلاً بنواته أن يهجرها تاركصا نفسه ينجـــذب للقوى التى تغريه؟ هل مبادئ الإلكترونات ضعيفة لدرجة أنها تكون مـــستعدة لأن تلحق بأول نواة تجذبها؟

سنرى كيف أن الإلكترونات التى هى بطبيعتها متقلبة تحترم مع ذلك مبـــدأ قويًا، وهو ما يفسر أغلبية الخواص الكهربية للمادة.

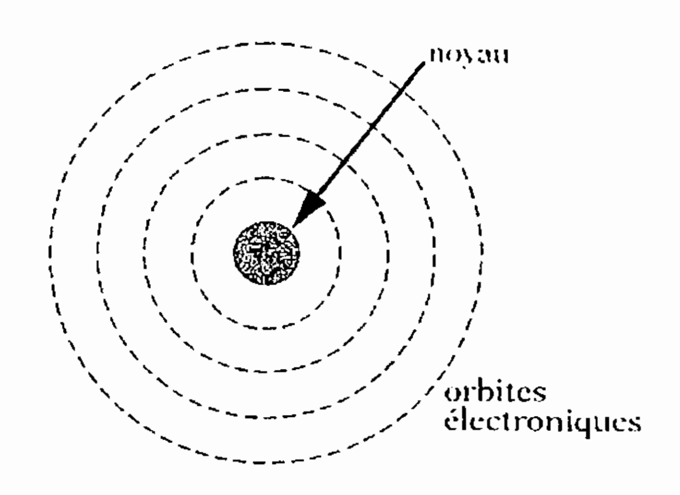
سنتناول إذن حالة المواد العازلة والموصلات والموصلات فائقة التوصـــيل. وهذه الأخيرة التى لا تزال تمثل لغزًا كبيرًا، يمكنها أن تحدث ثورة صناعية.

---

(٦٨) نص المحاضرة رقم ٢٢٦ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٣ أغسطس ٢٠٠٠.

الـــذرة

سنصف المادة مستخدمين الذرة كمكون أولى. تتــضمن الــذرة، كمـــا هـــو موضح فى الشكل رقم (١) نواة ذات شحنة موجبة، وتتكون النواة مـــن نترونـــات وبروتونات، وتدور حولها الإلكترونات التى تحمل شحنة سالبة. إن الشحنة الكليـــة للإلكترونات تعادل شحنة النواة، ومن ثم فإن الذرة متعادلة كهربيًا. وإذا عرضـــنا مثل هذه الذرة لمجال كهربى فإن الإلكترونات تخضع لقوة فى الاتجـــاه المعـــاكس لاتجاه المجال، فى حين تخضع النواة لقوة فى اتجاه المجال نفسه.



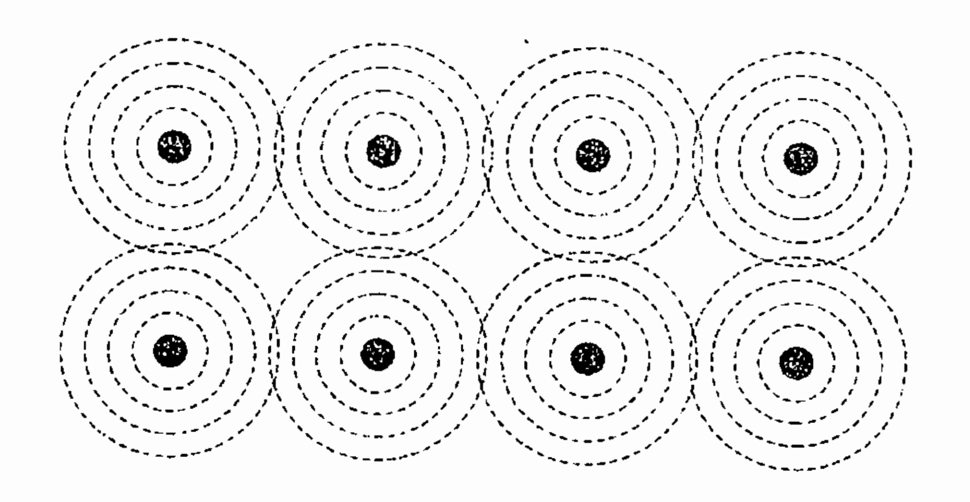
الشكل (١)
تدور الإلكترونات فى مدارات مختلفة حول النواة.

مع الأخذ فى الاعتبار القوى الداخلية للذرة، فـــإن الإلكترونـــات والنـــواة لا يبتعدون إلا قليلاً جدًا عن بعضهم البعض، وتظل الإلكترونات مرتبطة بنواتها. هذا الوضع هو الذى نجده فى الغازات، وفى النظم التى تكون فيهـــا المـــسافات بـــين الذرات وبعضها البعض كافية.

لرؤية ظهور تيار كهربى، يتعين انتزاع إلكترون أو عدة إلكترونات من ذراتها. ولحدوث ذلك، يتعين تزويدها بطاقة أكبر من الطاقة التى تحتجزها. إن الإلكترونات تحتل، فى الواقع، مدارات حول النواة تتميز بطاقات محددة جدًّا. كما لا يستطيع أى مدار أن يحتوى إلا على عدد محدد من الإلكترونات. إذن، للانتقال من مدار إلى آخر، أو لانتزاع إلكترون من الذرة يتعين إمداده سواء بالطاقة التى تفصل المستويين فى حالة تغيير المستوى، أو طاقة الإرتباط بالذرة فى حالة انتزاع الإلكترون.

إن الطبيعة تقدم لنا مثل هذه الاحتمالات. فالأشعة الكونية التى تأتينا من الفضاء الخارجى تكون حاملة لطاقة كبيرة قادرة على انتزاع الإلكترونات. وللنشاط الإشعاعى التأثير نفسه. ويتعلق الأمر فى الحالتين بأشعة مؤينة. وتفصل هذه الأشعة الذرة المتعادلة كهربيًا إلى ذرة نزع منها إلكترون أو أكثر تسمى أيون، وإلى إلكترونات حرة. وبالتالى يكون قد تشكل نوعان من الشحنات الكهربية، وعند استعمال مجال كهربى، يكون كل نوع من الشحنات قابلاً للانجذاب فى اتجاهين متضادين. ويمكن عندئذ ملاحظة تيار كهربى ضعيف. إن هذا هو المبدأ المستخدم فى عدد كبير جدًّا من أجهزة قياس الإشعاعات المؤينة. وكانت تلك هى التقنية التى استخدمها بيير ومارى كورى لقياس أول عناصر مشعة، الراديوم، والبولونيوم، إلخ.

عندما يتم تقريب الذرات من بعضها البعض لتتكون مادة صلبة، فإن المدارات الإلكترونية تكون بكبر المسافة نفسها التى تفصل الذرات، كما يوضح الشكل رقم (٢). ويمكن إذن أن يصبح الإغراء كبيرًا بالنسبة لإلكترون ما، أن يهجر نواته لينضم إلى نواة مجاورة، ويكفى أن يمارس مجال كهربى قوة على هذا الإلكترون، لكى يمر من ذرة إلى أخرى متبنيًا سلوك الإلكترون "الحر".



الشكل (٢)

تركيب ذرى لمادة صلبة، حيث يستطيع إلكترون "حر" أن ينتقل من ذرة إلى أخرى.

ومن أجل التقليل من طاقتها، تنتظم الذرات، بشكل عام، بطريقة منظمة جدًا فى ترتيب دورى شبه تام، على الأقل على المسافات القصيرة. إن إلكترونات الطبقات العميقة، الأقرب للنواة، تكون مرتبطة بقوة بذراتها. وعلى النقيض، تكون إلكترونات آخر طبقة مسكونة هى الأكثر عرضة للانتقال.

سوف نشير إلى المجموع المتكون من النواة وإلكترونات الطبقات العميقة بقلب الذرة. وبهذه الطريقة، يمكن وصف الذرة بأنها إلكترون أو عدة إلكترونات ذات شحنة سالبة، حرة نسبيًا، تدور حول قلب ذرى موجب. وبالتالى يرتبط الترتيب المنتظم للذرات بترتيب منتظم لقلوب الذرات الموجبة، التى تولد مجالاً كهربيًا ناتجًا عن جهد ذى دورية مماثلة لدورية ترتيب الذرات.

وتخضع إلكترونات الطبقات المحيطية الخارجية لهذا الجهد الدورى. وتؤدى هذه الدورية إلى أن تفرض على الإلكترونات قيمًا للطاقة محظورة وقيمًا للطاقة

مسموح بها. إن هذا القانون العام للفيزياء، المرتبط بالنظم الدورية، يكون فى بعض الحالات محسوسا مباشرة لحواسنا، كما فى حالة النظر إلى سطح إسطوانة مدمجة مثلاً. إننا برصد الضوء المنعكس من مثل هذا السطح، نرى ظهور ألوان أو ألوان متقزحة، تنجم عن فقد بعض نطاقات الترددات فى الضوء المنعكس. هذا الضوء الذى وصل كضوء "أبيض"، أى متضمناً كل الأطوال الموجية التى تستطيع العين رصدها، أصبح بعد الانعكاس على البنية الدورية، التى يمثلها الترتيب المنتظم للحفر الدقيقة للإسطوانة المدمجة، ضوءًا ملونا بالنسبة للعين. إن بعض الأطوال الموجية لم تتمكن من أن تنعكس.

تتوزع الطاقات المسموح بها لإلكترونات مادة صلبة بطريقة متصلة فى نطاقات طاقة مسموح بها، يفصل فيما بينها مناطق طاقات محظورة تسمى نطاقات محظورة.

ومن ثم يتعين على الإلكترونات أن تتوزع داخل نطاقات الطاقة المسموح بها. وطبقًا لقانون عام للطبيعة، فإن الإلكترونات تسعى لأن تضع نفسها فى أوضاع الطاقة الأقل. فى ظل هذه الظروف، لماذا لا تتجمع كلها فى وضع الطاقة الأدنى؟ لأنها تحترم مبدأ باولى (Pauli)، الذى ينص على أنه لا يمكن أن يحتل وضعًا طاقيًا معيناً سوى إلكترون واحد فقط. وبالتالى كانت حياة الإلكترونات ستصبح تعيسة جدًا. لكن لحسن الحظ منحتها الطبيعة حركة دوران على نفسها تسمى "اللف الذاتى" (spin). إن اللف الذاتى للإلكترون يستطيع أن يأخذ قيمتين، وهو ما يسمح بخلق بيتين صغيرين للإلكترونات داخل أوضاع الطاقة كما وصفت سابقًا. وهكذا، وبفضل اللف الذاتى يمكن جمع إلكترونين دون التناقض مع مبدأ باولى (Pauli).

وباحترام هذه القاعدة، ستحتل إلكترونات مادتنا الصلبة تدريجيًا، كل الأوضاع المسموح بها انطلاقًا من الأكثر عمقًا. وهكذا ستملأ الإلكترونات أول نطاق، وعندما يصبح ممتلئًا، ستملأ أول نطاق حر فوقه، وهكذا دواليك حتى يتم

تسكين كل الإلكترونات. ويرمز فى الشكل رقم (٣) لعملية امتلاء النطاقات بالتظليل. ويكون هناك بالتالى وضعان ممكنان مثل المبينين فى (أ) و(ب).

لنفرض أن الطاقة الأخيرة التى تحتلها الإلكترونات تقع عند قمة نطاق مسموح به (الشكل ٣أ)، ولنفرض أنها تقع وسط مثل هذا النطاق (الشكل ٣ب). إن هذا الفرق الضئيل ظاهريًا له مع ذلك عواقب كبيرة على السلوك الكهربى للمادة الصلبة.

الشكل (٣)

نطاقات طاقة الإلكترونات. أخر طاقة احتلتها الإلكترونات تقع: (أ) عند قمة نطاق مسموح به، (ب) وسط نطاق مسموح به (التظليل يشير إلى مستويات الطاقة المحتلة).

المواد العازلة

لندرس أولاً الحالة المعروضة فى الشكل رقم (٣أ)، حيث يتضح أن نطاقين مسموحًا بهما مليئان، وكل النطاقات المسموح بها الأعلى منهما فارغة. وسنقوم الآن بتعريض المادة لمجال كهربى E وذلك مثلاً بفرض فرق جهد كهربى عند طرفى مادتنا. هذا المجال يمارس قوة $F = qE$ حيث q هى شحنة الإلكترون. قد نميل إلى

الاعتقاد بأن الإلكترونات الخاضعة لهذه القوة سوف تجذب في حركة ذات عجلة ثابتة. فى الحقيقة، تكون الحركة غير ممكنة. فيما أن كل النطاقات المسموح بهـا مليئـة، لا تستطيع الإلكترونات أن تترك نفسها تجذب، رغم القوة التى تحرضها على ذلك.

إن الأمر يحدث كما لو كانت هناك عربة مترو فى لحظة الذروة، ويلوح لنا فى الطرف الآخر للعربة شخص نود التوجه نحوه (القوة التى تجـذبنا)، لكننـا لا نستطيع ذلك لأنه لا توجد أماكن شاغرة يمكن التقدم من خلالها بواسطة سلسلة من الإزاحات الأولية. إن غياب حركة الإلكترونات فى وجود مجال كهربـى، يـسمح باعتبار أن مثل هذه المادة عازلة للكهرباء.

وتستخدم المواد العازلة كثيرًا فى النظم الكهربية لفصل المـواد الموصـلة، ولحمايتنا من أخطار الكهرباء، أو حتـى لنقـل المعلومـات كمـا فـى الأليـاف البصرية.بالإضافة إلى ذلك، فإن بعض المواد العازلة تمتلك خواص مدهشة تمامًا. توجد،على سبيل المثال، مواد يؤدى تعريضها لإجهاد ميكانيكى إلى ظهور شحنات كهربية. وهو ما يسمح بتحويل فعل ميكانيكى إلى إشارة كهربية. وتوجـد العمليـة المعاكسة التى يولد فيها تعريض المواد إلى فرق جهد كهربى أو مجـال كهربـى، إجهادًا ميكانيكيًا لها أو تغييرًا فى شكلها. وتسمى تلك المواد، الخاصة جدًا، مـواد ذات كهربية إجهادية (piézoélectriques)... ولقد أحدثت هذه المواد ثـورة فـى العديد من مجالات حياتنا الجارية: مثل الاتصالات عـن بعـد، وقيـاس الـزمن ومجالات أخرى كثيرة. ويستخدم الكوارتز (بلّـور صـخرى)، المعـروف جـدًا، لموازنة الترددات أو قياس الزمن بدقة. وتعتبر الساعات التى تعمل بالكوارتز مـن المنتجات ذات الاستهلاك الكبير.

كما تستخدم الأجسام ذات الكهربيـة الإجهاديـة (piézoélectriques) فـى تطبيقات أخرى، مثل اكتشاف قاع البحر. إن جهـاز الـسونار،[٦٩] الـذى يـسمح

---

(٦٩)مسبار بالصدى وهو جهاز يكشف مواضع الأشياء تحت الماء بواسطة الموجات الصوتية. (المترجم)

باستكشاف المنطقة التى أمام السفينة تحت الماء، يساعد على تفادى التصادم برصيف صخرى أو بجبل جليدى عائم. ويستخدم تخطيط الصدى[٧٠] الطبى، المنتشر حاليًا فى مجال طب النساء مثلاً، موجات فوق صوتية تنتجها وترصدها محولات وناقلات للطاقة مصنوعة من مواد ذات كهربية إجهادية.

كما تمتلك مواد عازلة أخرى العديد من الخواص المدهشة. فبعض الأجسام، المسماة كهروحرارية (pyroélectriques)، تولد شحنات كهربية عند تعرضها لتسخين ضعيف. إن الإشعاع البسيط المنبعث من الجسم البشرى فى شكل موجات تحت حمراء، يسمح بإطلاق عملية فتح الأبواب الذاتية الفتح، أو باكتشاف الدخلاء فى مبنى تحت المراقبة. وربما ذات يوم، ستسمح هذه المواد ذات الكهربية الحرارية بالاكتشاف المبكر لحالات سرطان الثدى.

أشباه الموصلات

لنفترض الآن أن الفاصل بين آخر نطاق ممتلئ، المسمى نطاق التكافؤ، وأول نطاق فارغ، المسمى نطاق التوصيل، هو بحدود مقدار الطاقة الناجمة عن الإثارة الحرارية. فى هذه الحالة يمكن، مع مراعاة الحفاظ على الطاقة، تخيل أن بعض الإلكترونات تمتص حبيبات الطاقة الحرارية مما يجعلها تقفز فى النطاق الخاص بالتوصيل. إن مثل هذه المادة تمتلك خواصًا غير عادية. ويقلل تبريد هذه المادة احتمال حدوث مثل هذه الانتقالات، بينما تؤدى زيادة درجة الحرارة إلى زيادة هذا الاحتمال. وبهذه الطريقة، يكون لدينا عند درجة الحرارة المنخفضة، نطاقات ممتلئة تعلوها نطاقات فارغة. إنها إذن مادة عازلة. وعلى النقيض، عند درجة حرارة عالية عندما تقذف الإلكترونات من نطاق التكافؤ نحو نطاق التوصيل، يظهر تأثيران مكملان لبعضهما. ففى نطاق التكافؤ، تمثل حالات غياب الإلكترونات فرصًا للإلكترونات التى بقيت تسمح لها بالانتقال تحت تأثير المجال

---

(٧٠)صورة صوتية لاكتشاف أصداء الأعضاء وبخاصة لمراقبة نمو الجنين. (المترجم)

(عربة المترو فرغت جزئيًا وأصبحت الحركة ممكنة). ويكون لدينا إذن تيار في وجود مجال كهربي.

لكن بالطريقة نفسها، نجد أن بعض الإلكترونات التي قذفت في نطاق التوصيل والتي تحيط بها حالات شاغرة، تستطيع بسهولة كبيرة أن تنتقل تحت تأثير القوة الناتجة عن المجال التي تتعرض له المادة. وتنتج أيضًا هذه الإلكترونات تيارًا كهربيًا. إن هذه المادة الغريبة، العازلة عند درجة الحرارة المنخفضة والموصلة عند درجة الحرارة الأكثر ارتفاعًا، هي ما يسمى أشباه الموصلات الذاتية. إن اعتماد الخواص الكهربية لهذه المادة على درجة الحرارة بشكل كبير يجعلها غير مناسبة للاستخدام في التطبيقات الصناعية. من سيقبل أن يكون لديه جهاز تلفاز أو مذياع أو هاتف لا يعمل بشكل مرضٍ إلا في درجات حرارة تتراوح بين ٢٠ إلى ٢١ درجة مئوية. لهذا السبب، تستخدم صناعة أشباه الموصلات حيلة، ألا وهي إضافة شائبة إلى أشباه الموصلات لتعديل خواصها التوصيلية. وتقوم هذه العملية على إضافة ذرات أخرى ليس لديها عدد الإلكترونات نفسه، مكان بعض الذرات المكونة للمادة. وبالتالي، بإحلال ذرة زرنيخ لديها خمسة إلكترونات في مدارها الخارجي، محل ذرة لديها أربعة إلكترونات في المدار الخارجي، كما في حالة الجرمانيوم، نجد أنفسنا مع إلكترون إضافي دون أن يخلق ذلك غياب إلكترونات في نطاق التكافؤ. ومن ثم يصبح لدينا مادة شبه موصلة خارجية. وهذا النوع من أشباه الموصلات منتشر جدًا لدرجة أنه لا يضاف عامة كلمة "خارجي"، وتستخدم فقط التسمية المختزلة: أشباه موصلات.

الموصلات الضوئية

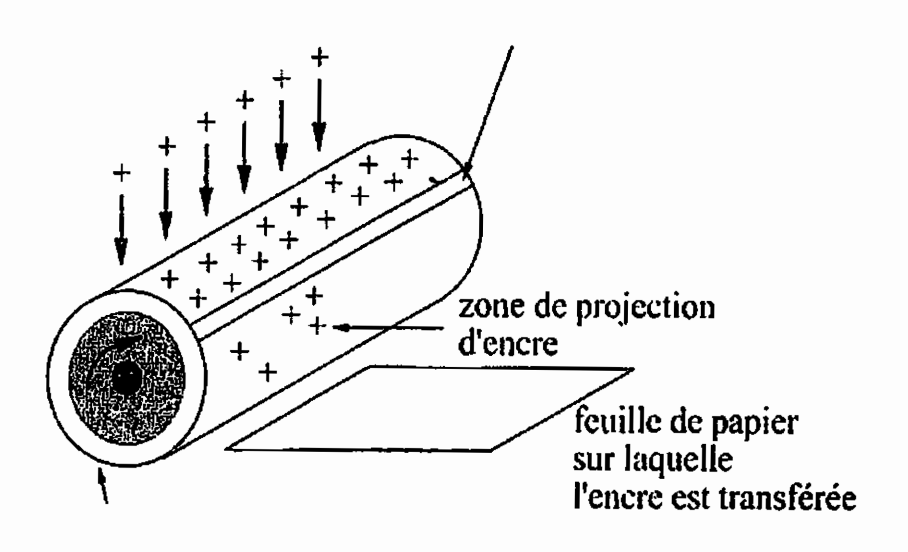
لنعود إلى الشكل رقم (٣أ) حيث نطاق التكافؤ ممتلئ ونطاق التوصيل فارغ. وبدلاً من استخدام طاقة الإثارة الحرارية للقذف بإلكترون من نطاق نحو نطاق التوصيل، نستخدم الآن طاقة إشعاع كهرومغناطيسي. وتتكون مثل هذه الطاقة من حبيبات أولية اسمها فوتونات. في هذه الحالة، يسمح امتصاص فوتون بأن يتم

إرسال إلكترون من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل، مع احترام مبدأ الحفاظ على الطاقة. وهكذا نجد أنفسنا فى موقف مشابه للموقف الذى وصف سابقًا: لقد أصبحت المادة موصلة. إن هذه المواد لديها الخاصية الغريبة بأن تكون عازلة فى الظلام وموصلة فى الضوء، وتسمى هذه المواد موصلات ضوئية (photoconducteurs).

إننا نستخدم فى محيطنا اليومى، دون أن نعرف، مثل هذه المواد، فى أجهزة تصوير المستندات مثلاً أو فى الطابعات التى تعمل بالليزر. ما مبدأ تشغيل هذه الأجهزة؟ كما هو مبين فى الشكل رقم (٤)، تغطى طبقة من موصل ضوئى إسطوانة موصلة تدور حول محورها. ويتم وضع طبقة منتظمة من الشحنات الكهربية، المفترض هنا أنها موجبة، على امتداد خط على هذه الإسطوانة. إن هذه الشحنات الموزعة على سطح الموصل الضوئى لا يمكنها أن تتسرب نظرًا للطبيعة العازلة لهذه المادة المحتفظ بها فى الظلام. وإذا تم بواسطة نظام بصرى تقليدى إسقاط صورة مستند يراد نسخه، تصبح بعض النقاط المضاءة موصلة بينما تظل مناطق أخرى فى الظلام، وهو ما يتطابق على التوالى مع المناطق البيضاء (المضاءة) أو السوداء (المكتوبة) من المستند الأصلى. وبهذه الطريقة، يتم خلق توزيع للشحنات الكهربية على سطح الموصل الضوئى، الذى ينقل بدقة توزيع المناطق السوداء على المستند الأصلى. ويتم بالتالى الحصول على صورة كهربية. يبقى إظهار هذه الصورة. ويكفى للقيام بذلك إلقاء مسحوق ملون، أسود مثلاً، يتم جذبه بواسطة المناطق المشحونة كهربيًا، ثم وضع ورقة ملامسة لسطح الموصل الضوئى الحامل للحبيبات الملونة لنقلها على الورقة. وأخيرًا، بتسخين الورقة الحاملة لهذه الحبيبات بشدة وسرعة يتم صهر هذه الحبيبات، وهو ما يسمح لها بالنفاذ فى الورق نفاذا خفيفا. وبذلك تكون قد انتهت عملية تصوير المستند.

وينطبق المبدأ نفسه على الطابعات التى تعمل بالليزر، فيما عدا أنه بدلاً من استخدام نظام بصرى لإسقاط صورة المستند المطلوب نسخه على الموصل الضوئى، يستخدم مصدر ضوئى، صمامات ليزر ثنائية على سبيل المثال، تضئ

بشكل اختيارى الموصل الضوئى طبقًا لتعليمات يتلقاها من حاسوب، أو من خـــط هاتف فى حالات الطباعة عن بعد.



الشكل (٤)

مبدأ تشغيل جهاز تصوير المستندات.

الموصلات

لنرجع الآن إلى الوضع الموصوف فى الشكل (٣ب)، عندما يقع المـــستوى الأقصى للامتلاء بالإلكترونات داخل نطاق طاقة مسموح بها. فـــى هـــذه الحالـــة، يؤدى تعريض الإلكترونات لمجال كهربى، وبالتالى لقوة، إلى انتقال الإلكترونـــات الواقعة على الحدود بين الأوضاع المشغولة والأوضاع الـــشاغرة. فـــى الواقـــع، تستطيع هذه الإلكترونات المحاطة بأوضاع شاغرة أن تنتقـــل تحـــت تـــأثير هـــذا المجال. ومن ثم ينشأ تيار كهربى. إن مثل هذه المواد هى موصلات للكهرباء، مثل الفلزات على سبيل المثال.

إن إلكترونات فلز ما تنجذب تحت تأثير المجال الذى تتعرض له، وتخضع لحركة متسارعة بشكل منتظم. وبالتالى، كان يتعين أن يزيد التيار بطريقة مستمرة لكننا نعرف أن ذلك لا يحدث. إن التيار يستقر عند قيمة معينة تعتمد على مقاومة الموصل المستخدم.

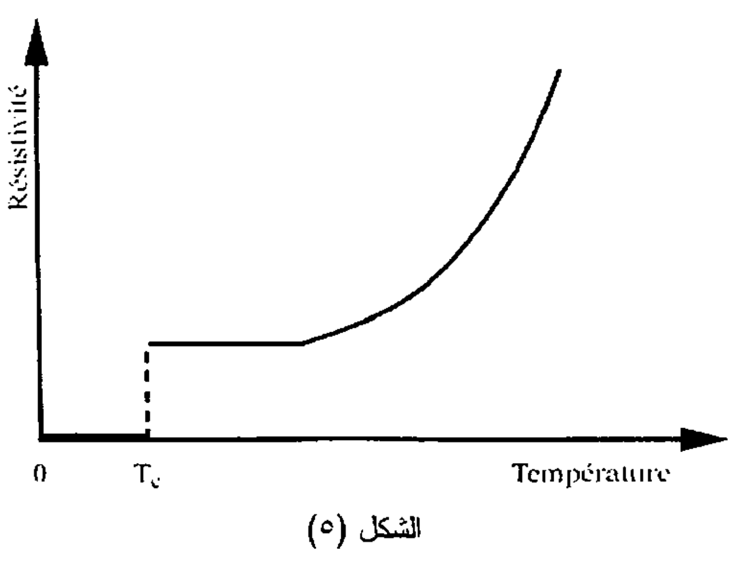
من أين تأتى هذه المقاومة؟ إذا كانت المادة مثالية، أى إذا كان فرق الجهد الذى يبحر فيه الإلكترون دوريًا تمامًا، فلن يحدث أى اضطراب للمسار المتبع. لكن، هناك فى الواقع، عدة ظواهر تحطم هذه الدورية المثالية. فالشوائب الكيمائية، والتشققات والصدوع الموجودة فى المادة تؤدى إلى حالات انقطاع موضعى للدورية.

ويقود هذان العاملان إلى الحد من المسافة التى يستطيع إلكترون اجتيازها دون "تصادم"، وتسمى هذه المسافة المسار المتوسط الحر. وهى تعتمد على النقاء الكيمائى والنوعية البلّورية للمادة. وبالتالى، فإن النحاس النقى أقل مقاومة بكثير من النحاس الذى به شوائب. ومن هنا تكمن أهمية تنقية النحاس فى صناعة الأسلاك الكهربية.

من ناحية أخرى، تؤدى الإثارة الحرارية، التى تجعل الذرات تتذبذب حول موضع التوازن الخاص بها، إلى تشوهات للجهد الدورى، وبالتالى، إلى الحد من المسار المتوسط الحر... ونرى إذن ظهور عامل جديد يؤثر على المقاومة الكهربية.

وعند درجات الحرارة العالية يكون المسار المتوسط الحر للإلكترونات صغيرًا وتكون المقاومة كبيرة. وبتخفيض درجة الحرارة يصبح المسار المتوسط الحر أكبر، وهو ما يخفض المقاومة كما يتضح من الشكل رقم (٥). وبالتالى تختلف المقاومة الكهربية لسلك المصباح الكهربى حسب ما يكون المصباح مضاء (ساخن) أو مطفأ (بارد). إن تخفيض درجة حرارة موصل ما، يقلل مقاومته إلى أن يصبح المتحكم فى هذه المقاومة بشكل غالب، هو التصادم مع الشوائب الكيمائية

أو العيوب البلّورية وليس عيوب الدورية الناجمة عن الإثارة الحرارية. فى الـشكل رقم (٥) يتطابق مثل هذا الموقف مع مرحلة الاستقرار النسبى الأفقى والتى يميـز مستواها نوعية المادة.



الشكل (٥)

تغير المقاومة النوعية لموصل تبعًا للحرارة. وبالإضافة إلى ذلك، يلاحظ فى الحالة المبينة وجود درجة حرارة حرجة Tc تكون المادة فائقة التوصيل عند درجات الحرارة الأدنى منها.

المواد فائقة التوصيل

فى بعض الحالات تبرز ظاهرة غريبة. تحت درجة حرارة معينة، تـسمى درجة الحرارة الحرجة، تنعدم المقاومة الكهربية، وتظهر العديـد مـن الخـواص الرائعة، خاصة الخواص المغناطيسية. إن المواد التى تبدى هذا السلوك تسمى مواد فائقة التوصيل (supraconducteurs). لماذا لا توجد هذه المواد فى كل مكان فـى حياتنا اليومية وفى الصناعة؟ لسبب بسيط، ألا وهو القيمة المتدنية لدرجة الحـرارة الحرجة. عند اكتشاف هذه المواد عام ١٩١١ فى ليدن (Leiden)، كانت درجـات

الحرارة الحرجة بحدود ٢٦٩- درجة مئوية أى ٤,٢ كلفن. إن الاهتمـام العلمـى والصناعى بالمواد فائقة التوصيل أثار جهودًا كبيرة من أجل زيادة درجة الحـرارة تلك. لكن لم تحقق الجهود الكبيرة التى بذلت حتى عام ١٩٨٦ سوى نتائج محدودة، ففى ٧٥ عامًا كسب العلماء حوالى ٢٠ درجة مئوية، حيث ارتفعت درجة الحرارة الحرجة من ٢٦٩- درجة مئوية إلى ٢٥٠- درجة مئوية. ولا تزال درجة الحرارة تلك غير مشجعة على الإطلاق. من سيحب أن يكون لديه مذياع أو تلفاز أو هاتف يعمل فى هذه الظروف؟

غير أن بعض التطبيقات الصناعية رأت النور، خاصـة لخلـق مجـالات مغناطيسية قوية بواسطة ما يسمى ملفات فائقة التوصيل. فى المستـشفيات، علـى سبيل المثال، يستخدم العديد من أجهزة التصوير بواسـطة الـرنين المغناطيـسى النووى مثل هذه الأنظمة.

لماذا لم تعد الإلكترونات فى المواد فائقة التوصيل تخـضع للقـوانين التـى كانت تفسر أنماط السلوك المرصودة بشكل تقليدى؟ إن الإلكترونات عنـد درجـة حرارة أقل من درجة الحرارة الحرجة تتجمع فى شكل أزواج تسمى أزواج كـوبر (Cooper). وتكون طاقة زوج كـوبر (Cooper) أدنـى مـن مجمـوع طاقـة الإلكترونين الأعزبين. وهنا أيضًا، ستقوم الطبيعة على وجه السرعة بمـلء هـذا المستوى من الطاقة على حساب حالات العزاب، لأن أزواج كوبر (Cooper) لـم تعد تخضع لمبدأ باولى (Pauli)، على نقيض الإلكترونات العزاب. وبالتالى يكـون سلوك هذه الأزواج مختلفًا تمامًا.

فى عام ١٩٨٦ حدثت ثورة هزت الجماعة العلمية الدولية، وهزت الموجات المتتالية العالم الصناعى ثم العالم السياسى: لقد كسب باحثان هما بدنوز (Bednoz) ومولر (Muller) بضع درجات حرارية، وفى الأسابيع التى تلـت ذلـك، سـيطر حماس شديد على كل معامل العالم. إن درجة الحرارة الحرجـة ترتفـع بـسرعة كبيرة، وسرعان ما تجاوزت ٧٧ كلفن (حوالى ٢٠٠- درجة مئوية)، وهى درجـة

حرارة النيتروجين السائل، الذى يعتبر منتجًا صناعيًا يسهل الحصول عليه وذو استخدام شائع.

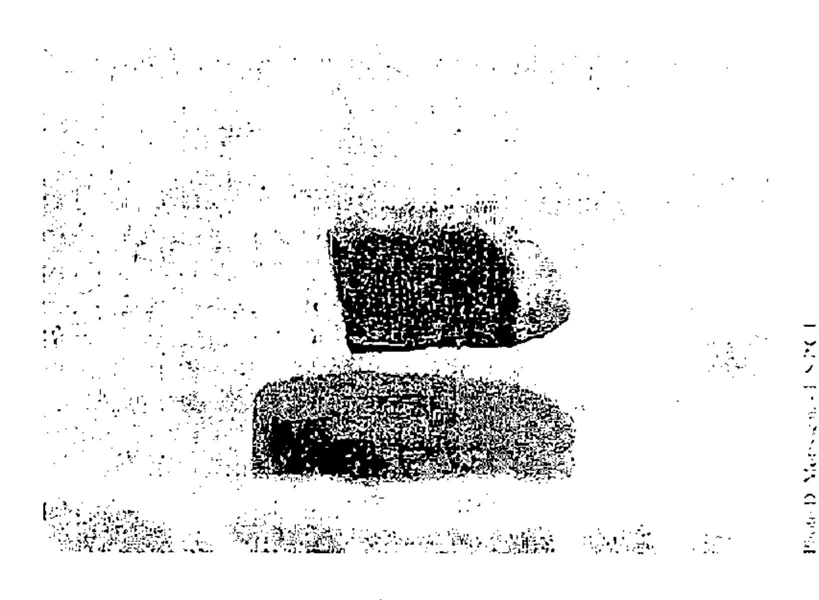
وتفتح هذه الاكتشافات الطريق للعديد من الأعمال وتثير آمالاً عريضة في إمكانية تحقيق المزيد من زيادة درجة الحرارة الحرجة.

وحاليًا، تعمل مختلف المعامل فى العالم على هذه الظواهر التى لا يزال فهمها غير مكتمل. فى الشكل رقم (٦) نرى مغناطيسًا صغيرًا مرتفعًا وسابحًا فى الهواء، فوق مادة فائقة التوصيل مغمورة فى نيتروجين سائل. إنها إحدى التطبيقات العديدة جدًّا لهذه التأثيرات. حتى أن البعض يتطلع إلى استخدام هذه الطريقة لإنتاج قطارات فى حالة توازن مغناطيسى.

هل يعد اكتشاف مواد فائقة التوصيل عند درجة حرارة الغرفة حلمًا أم حقيقة مستقبلية؟ لا أحد يستطيع حاليًا التكهن بما سيحدث. غير أن الآمال والفضول يحفزان العديد من الباحثين فى جميع أنحاء العالم.

الخاتمة

لقد رأينا كيف تستطيع اختلافات فى تكوين المواد الصلبة، تبدو ظاهريًا طفيفة جدًّا، أن تعطى خواصًا كهربية مختلفة تمامًا. وهكذا انتقلنا من مواد عازلة جدًّا تقاوم بشدة مرور الكهرباء إلى مواد فائقة التوصيل حيث لا توجد مقاومة لمرور الكهرباء.



الشكل (٦)

مغناطيس يرتفع ويسبح فى الهواء فوق مادة فائقة التوصيل مغمورة فى النيتروجين السائل.

لقد قدم هذا المجال العلمى الشاسع تطبيقات متعددة فى حياتنا اليومية. لكن يظل فضول العلماء كاملاً فى محاولة فهم العديد من الألغاز الغامضة التى لا تزال حتى الآن بدون تفسير.

مجهريات المجال القريب[٧١]

بقلم: دمترى رودتشيف

Dimitri RODITCHEV

ترجمة: لبنى الريدى

ملخص

إن اختراع مجهر له تـأثير نفقـى (Scanning Tunneling Microscope) بواسطة جيرد بينيج (Gerd Binnig) وهنيريش روهـرر (Heninrich Rohrer) قد فتح مجالاً واسعًا للأبحاث العلمية والتطبيقات التكنولوجية. تسمح هـذه التقنيـة الجديدة لأول مرة بالمراقبة فى الحيز المباشر لذارات وتركيبـات ذريـة سـطحية لمجموعة كبيرة ومتنوعة من البيئات (الفوق فراغ، هواء، زيت، ماء، إلخ.). منـذ اختراع هذا المجهر النفقى، تم تطوير مجاهر أخرى ذات مجس موضعى، وخاصة المجهر ذى تأثير القوة الذرية الذى يسمح بالحصول على صور ليس فقط للأسطح الموصلة لكن أيضًا للأسطح العازلة. إن هذه الاختراعات ربما تصور مسبقًا فجـر ثورة صناعية للمتناهى الصغر "جزء من المليار" (النانو nano).

عبر القرون، حاول الإنسان دائمًا مراقبة العالم الذى يحيط به بمقياس متزايد الدقة. لذلك اخترع العدسة فى القرن الخامس عشر لمراقبة الحـشرات، والمجهـر البصرى فى القرن السابع عشر لمراقبة الخلايا الدموية أو البكتريا ....، لكن بـدا مستحيلاً مراقبة العناصر القصوى التى تتكون منها المادة: الذرات. وكـان يتعـين انتظار اكتشاف الميكانيكا الموجية لكى يتجدد الأمل. إن الجسيمات التى تتكون منها المادة يمكنها أن تتصرف كموجات طولها الموجى صـغير جـدًا: ٠,١ نـانومتر ($١٠^{-١٠}$)، أى حجم الذرة. ومن هذه الازدواجية موجة – جـسيم سينـشأ المجهـر

(٧١) نص المحاضرة رقم ٢٢٧ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٤ اغسطس ٢٠٠٠.

الإلكترونى - حيث يحل محل المصدر الضوئى للمجهر البصرى مصدر إلكترونات - وحديثا جدًا المجهر ذو التأثير النفقى.

إن حلم الإنسان بأن "يرى الذرات واحدة واحدة لكى يفهم المادة، أصبح حقيقة بفضل اختراع باحثين فى شركة IBM (زيورخ)، هما جيرد بينيج (Gerd Binnig) وهنيريش روهرر (Heninrich Rohrer)، عام ١٩٨٢. وقد حصل هذان الباحثان فى خريف ١٩٨٦ على جائزة نوبل فى الفيزياء عن هذا الاكتشاف. وترجع هذه السرعة بين الاختراع وتكريم مخترعيه إلى حقيقة أن هذه المجهرية الحديثة تقدم "نظرة" جديدة للمادة، وأن مجال تطبيقها شاسع ويتعلق بميادين متنوعة من الفيزياء والكيمياء والبيولوجيا. لقد تمكنا من رصد، بمقياس الذرة، أسطح أشباه موصلات وفلزات وأيضًا أجسام صغيرة ("نانو" - أجسام): جزيئات بلّورات صغيرة، مترسبة على طبقة سفلية. ويعمل هذا المجهر بدون عدسات وفى ظل جميع درجات الحرارة، ابتداء من ٢٦٩- درجة مئوية (درجة حرارة الهليوم السائل) حتى أعلى من درجة حرارة الغرفة.

منذ اختراع هذا المجهر، ظهرت مجموعة من المجاهر الأخرى:

- المجهر ذو الطاقة الذرية الذى يسمح بإظهار صورة ذات حدة تمييز ذرية لسطح عازل.
- المجهر ذو القوة المغناطيسية، الذى يسمح بتحديد التركيب المغناطيسى لعينة ما.
- المجهر ذو القدرة التوصيلية الأيونية، الذى لا يتمتع بحدة التمييز الذرية لكنه يسمح بأن يجعل سطح غشاء بيولوجى مرئيًا فى وسط سائل.
- المجهر البصرى ذو الموجة المتلاشية، الذى يسمح بإعطاء صورة للشبكات البصرية بحدة تمييز تصل إلى ١٠ نانو متر، إلخ.

لكل هذه المجاهر مبدأ مشترك:يطوف رأس - مسبار فوق السطح المطلوب تحليله وتتكون الصورة بقياس موضعى للتفاعل بين السطح والرأس. ويعتمد هذا التفاعل على التركيب الموضعى للعينة، وبالتالى يكون لدينا مسبار موضعى فى

الحيز الحقيقى. إن كل المجاهر الأقدم الأخرى لتحليل الأسطح، التى تحسب متوسطًا على السطح للحزمة الساقطة (من ١ مم٢ إلى μ م٢) والتى تصاحبها ظواهر الحيود والانكسار، لا تسمح برؤية التفاصيل الدقيقة للسطح.

المجهر ذو التأثير النفقى

مبدأ المجهر ذو التأثير النفقى

يرتكز هذا المبدأ على تأثير كمى: التأثير النفقى. يتعلق الأمر بإمكانية أن يجد إلكترون ينتمى أصلاً إلى قطب كهربى فلزى، نفسه فى قطب آخر مجتازًا حاجزًا رقيقًا من الفراغ أو المادة العازلة التى تفصل القطبين. إن الفيزياء التقليدية تحظر مثل هذا السيناريو: التيار الكهربى (دفق الإلكترونات) لا يمر عبر الوصلة إلا إذا تلامس القطبان. لكن الفيزياء الكمية فى المقابل، تأخذ فى الاعتبار ازدواجية فراغ – جسيم وتتوقع تأثير النفق. إن الذرات تتكون من أنوية ثقيلة ذات شحنة موجبة، وإلكترونات ذات شحنة سالبة تنجذب إلى الأنوية، وتدور حولها. وعندما يتشكل فلز، تكون الذرات متقاربة وتتفاعل فيما بينها بقوى كولومية. وكل ذرة، محاطة بذرات أخرى تجذب إلكترونات جيرانها، تتخلى عن إلكترون، ليصبح حرًا ويستطيع بالتالى التنقل داخل الفلز. وتجد ذرات السطح نفسها فى موقف مختلف: من ناحية، فإنها تتفاعل مع ذرات الحجم، لكن من ناحية أخرى، لا توجد ذرات. ومن ثم تقوم أنوية ذرات السطح باسترجاع الإلكترون، الحر فى التنقل داخل فلز، بمجرد أن يحاول مغادرة المادة الصلبة للتواجد فى الفراغ. وإذا أخذنا بالوصف الكمى بتعبير الموجات، فإن الإلكترون فى الفراغ يمكن وصفه بموجة متلاشية تتناقص سعتها بسرعة جدًا (بشكل أسى) – وإذا لم يكن الفلز الثانى بعيدًا جدًا (مسافة أقل من ١–٢ نانو متر) ستنتقل الموجة المرتبطة بالإلكترون ويستطيع التيار أن يمر. لذلك، يكفى استعمال جهد مستمر ضعيف بين الفلزين، لتمر الإلكترونات من فلز إلى الآخر: لا يكون التيار صفرًا. لقد تم اكتشاف تأثير النفق عام ١٩٢٨،

وفى عام ١٩٦٠ قام إ. جيافيه (I. Giaver) (جائزة نوبل أخرى فى الفيزياء) بإثبات الظاهرة فى تركيبات من نوع تصميم الطبقة البينية، فلز-عازل-فلز، إن التيار الإلكترونى فى الوصلات النفقية يتوقف بشكل كبير جدًا على المسافة بين القطبين، ويصبح لا قيمة له عندما تتجاوز المسافة الفاصلة بين الفلزين ٢ نانومتر (إن السلك المقطوع لا يسمح بمرور التيار الكهربى!).

وقام كل من جيرد بينيج (Gerd Binnig) وهنينريش روهرر (Rohrer Heninrich)، باستغلال هذه التبعية السريعة للتيار النفقى مع المسافة بين الفلزين، لقد أنتهما فكرة استخدام رأس فلزى كقطب أول. سيتم إذن حصر التيار النفقى بين طرف الرأس وقطب مستوى ثانى (فلز أو شبه موصل). ويصبح من الممكن بعد ذلك مسح الرأس أمام سطح هذه القطب، وقياس التغيرات فى التيار النفقى، مع وضع الرأس. إن خشونة على السطح المفحوص لا تتعدى ٠,١ نانومتر تجعل التيار النفقى يتغير بعامل ١٠.

وبتسجيل التيار النفقى لكل أوضاع الرأس، يتم إنجاز صورة طوبوغرافية للسطح وستتوقف حدة تمييزها على حجم الرأس - المسبار، أى بحدود حجم ذرة. ومن ثم يكون ممكنًا " رؤية" الذرات واحدة واحدة بواسطة جهاز يعمل طبقًا لهذا المبدأ. بالإضافة إلى ذلك، وبما أن التيار النفقى يحتوى على معلومات مهمة عن خواص الإلكترونات في مادة صلبة ما، يكون من المفيد تسجيل قيمته تبعًا للجهد عبر الوصلة. ويمكن القيام بهذه القياسات سواء في مكان مختار من السطح، أو عند كل نقطة من صورة طوبوغرافية. وفي الحالة الأخيرة، يتم الحصول على المعلومة الكاملة (طوبوغرافية وطيفية) فى آن واحد. إننا نتكلم عن المسح المطيافى النفقى أو STS (Scanning Tunneling Spectroscopy).

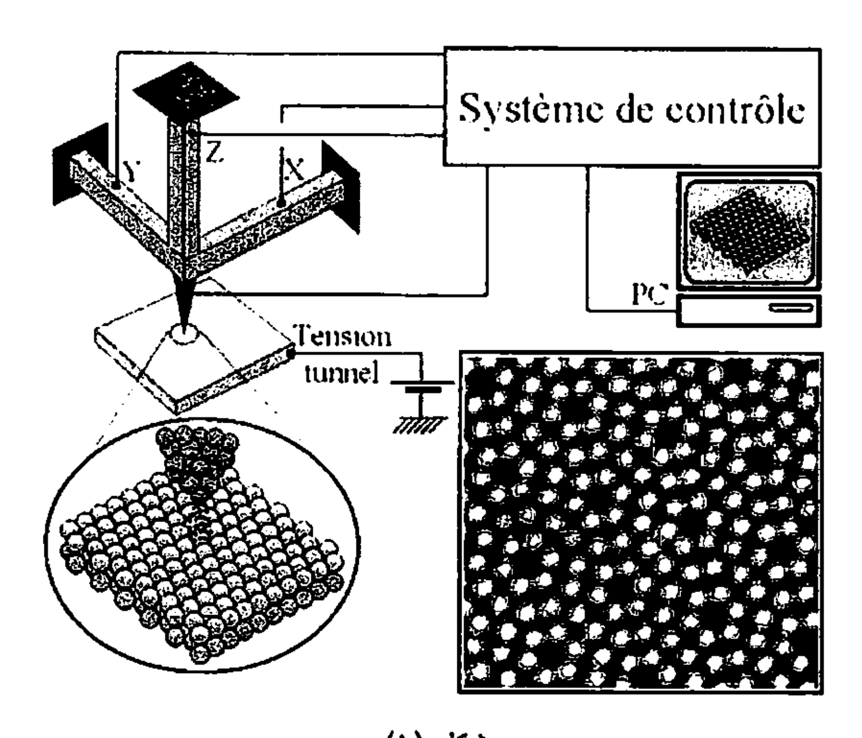
غير أننا نلاحظ على الفور الحصر الذاتى لهذه الطريقة: إن الإشارة المرصودة المستخدمة لتكوين صورة هى تيار إلكترونى، ومن ثم يمكن جعل أسطح الفلزات وأشباه الموصلات فقط هى المرئية.

سمة تجريبية

مبدأ:

يرتكز التنفيذ التجريبى على المبدأ التـالى: رأس، مصنوعة من مادة التنجستين (أو سبيكة البلاتين – اريديوم)، مرتبطة بشكل ثلاثى الأسطح يتكون من ثلاث قطع خزفية ذات كهربية إجهادية (X,Y,Z) (الشكل رقم ١). تتحكم الخزفية Z فى المسافة بين الرأس والسطح المطلوب تحليله، بينما Y,X تسمحان بانتقال الرأس بشكل موازٍ لهذا السطح. ويتم قراءة التيار النفقى فى الواقع بواسطة نظام تحكم يؤثر على جهد الخزفية Z، بحيث يحافظ على قيمة التيار النفقى مساوية لقيمة مرجعية. وعندئذ يتم تسجيل هذا الجهد (Z) تبعًا للوضع الجانبى (X,Z) للرأس فوق السطح. إن النقاط التجريبية الأكثر حساسية هى عزل المجهر تجاه الذبذبات الخارجية من ناحية، وتحديد مواصفات الرأس من ناحية أخرى. فى الحقيقة، تكون درجة حجم التجعدات المتوقعة على سطح العينة مرتبطة بالتحكم فى المسافة بين الرأس والسطح بحيث تكون ٠,٠١ نانومتر.

يجب إذن الاحتفاظ بمستوى تذبذب الرأس بالنسبة للسطح تحت هذا الحد. ويتم استخدام وسائل تكميلية، لأنه لا يتعين فقط ترشيح الذبذبات الخارجية إنما جعل الجهاز أيضًا جامدًا قدر الإمكان. إن المجاهر التى أنتجت منذ عام ١٩٨٢ تختلف من حيث الأولويات الممنوحة لأحد هذه السمات أو لآخر. كان أول مجهر ابتكره كل من جيرد بينيج (Gerd Binnig) وهنينريش روهرر (Heninrich Rohrer) مفصولاً عن الذبذبات المحيطة بواسطة جهاز يعمل بالاسترفاع (lévitation) المغناطيسى. منذ ذلك الحين، أصبحت التكنولوجيا أبسط، حيث تستخدم أغلب الآلات أجهزة ذات قاعدة من اليايات. ولخمد الذبذبات، تستخدم مواد خاصة مثل الفيتون (Viton)، أو الخمد بتيارات فوكوه (Foucault)، التى يتم حثها فى صفائح صغيرة من النحاس (ثابتة) بواسطة مغناطيسات متحركة. إن المجاهر الحالية غالبًا ما تستخدم ناقلة XYZ ذات كهربية إجهادية فى شكل إسطوانة مجوفة أصغر حجمًا من سابقتها، ذات الشكل الثلاثى الأسطح.



شكل (١)

مبدأ تشغيل المجهر ذى التأثير النفقى. داخل الإطار (أسفل يمين): التركيب الذرى لسطح السيليسيوم – إعادة تركيب (٧ × ٧). الكرات (البيضاء) تمثل ذرات السيليسيوم.

الرأس

إن الرأس (la pointe) بالطبع هى أحد العناصر الرئيسية للمجهر، لأنها هى التى تحدد حدة تمييز الجهاز. وفى أغلب الحالات، لا يزال تحضير الرؤوس تجريبيًا وكثيرًا ما تستخدم طرائق التحضير معالجة كهروكيميائية: لا يجب أن يكون للرؤوس حجم وشكل ملائمان فقط، لكن يجب أن تكون ثابتة أيضًا فى الزمن.

معالجة المعلومة:

هناك سمة أخرى لهذه المجهرية لا تتوقف عن التقدم وهى تتعلق بمعالجة المعلومة. تسجل فى التجربة إشارة z (x,y)، حيث تشير Z إلى البروز، و(x,y) هى إحداثيات نقطة ما للسطح. يتم معالجة هذه الإشارة الإلكترونية بمساعدة حاسوب ويتم تحويلها إلى درجة من الرمادى أو الألوان. بشكل عام، تكون النقاط الأعلى بيضاء، وتلك الواقعة فى الأسفل سوداء، وتتحول النقاط الوسيطة إلى درجات من الرمادية. ومن ثم هناك طرائق تمثيل مختلفة ممكنة، نظرة من أعلى، أو رسوم منظورية، أو ألوان، إلخ.

إن التأثير النفقى الذى يرتكز عليه عمل هذا المجهر يتواجد بمجرد أن يكون هناك فلزان، أو بشكل أعم موصلان، يفصل بينهما حاجز عازل رقيق. قد يكون هذا الحاجز هو الفراغ، وأيضًا الهواء، أو سائل غير موصل، أو عازل كهربى (أكاسيد، مركبات الأزوت مع الفلزات، إلخ.). إن هذه المجموعة الكبيرة من الاستخدامات هى التى تعطى المجهرية النفقية كل أهميتها. فى الواقع، يمكن أيضًا دراسة الأسطح النظيفة جدًّا فى جو من الفراغ الفائق لصنع فيزياء الأسطح، كما يمكن أن نأخذ مكانًا فى الهواء لمراقبة الأشياء الخاملة كيميائيًا، أو رؤية كيف تبدو عملية الأكسدة، أو مراقبة الأجسام البيولوجية فى وسطها السائل الطبيعى، إلخ.

مجال التطبيقات

من وجهة نظر الاستخدامات العلمية، يمكن تمييز قطبى اهتمام: من ناحية، دراسة أسطح أشباه الموصلات والفلزات، وهو ما يتطلب غالبًا مراقبة هذه الأسطح فى وسط فائق الفراغ. ومن ناحية أخرى، دراسة الجزيئات الممتصة على سطح ما، جزيئات عضوية أو ذات أهمية بيولوجية.

أشباه الموصلات

تتكون البلّورة من مستويات ذرية متكدسة دوريًا الواحدة على الأخـرى. إن المستوى الأخير، الذى يحدد السطح، مختلف عـن المـستويات الأخـرى، ومـن الصعب جدًا تحديد تركيبه. وتستطيع ذرات السطح الحرة أن تعيد ترتيـب نفـسها فيما بينها لإيجاد تركيب يقلل إلى أدنى حد طاقة السطح. ويقال إن هناك إعادة بناء للسطح. ويكون من الممكن حدوث ترسيب على هذا السطح فى شكل أغشية رقيقة، مواد أخرى أو جزيئات صغيرة. على سبيل المثال، في حالة مادة شبه – موصلة، سيتم ترسيب تركيبات على السطح تتدخل فى تشكيل الدوائر المتكاملة، ومن المهـم معرفة حالة هذا السطح بالمقياس النانومترى (واحد على مليار من المتر).

إن أشباه الموصلات التى يتم دراستها أكثر من غيرها هما، السيلسيوم (Si) لتطبيقاتها فى الإلكترونيات الميكروية، وزرنخيد الجاليوم (GaAc)، لتطبيقاتها فـى مجال الإلكترونات البصرية.

فى الشكل رقم (١) يمكن فى الإطار رؤية تركيب سطح السيليسيوم – الذى ظل مجهولاً لفترة طويلة – التركيب (٧ ×٧) حيث الحلقة التى يتعـين تكرارهـا لتكوين السطح هى معين ضلعه ٢,٨ نانومتر، وله فى الأركان الأربعة ثقب. وتمثل الكرات (البيضاء) ذرات السيلسيوم.

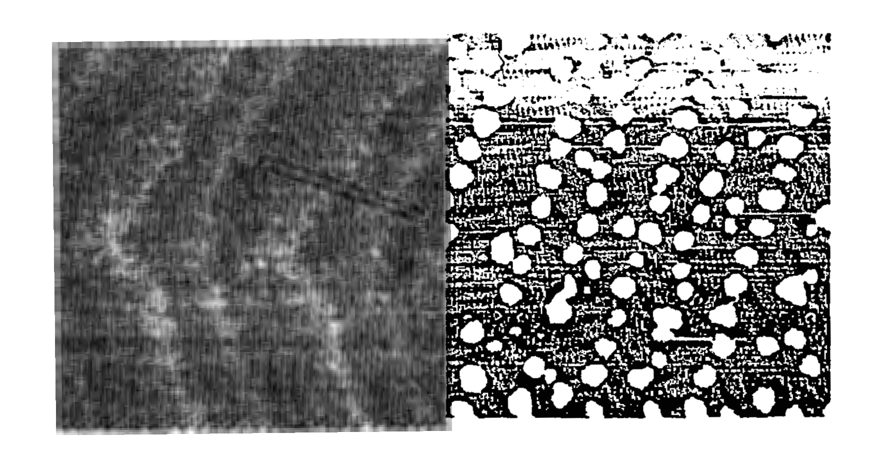
الفلزات

لقد كان الجرافيت من أكثر الأجسام التى تم دراستها فى المجهرية النفقيـة. ونظرًا لبنيته الصفائحية، فإنه ينفلق بسهولة فى الهواء، وبما أنه خامل كيميائيًا، فلقد أمكن فحصه فى مختلف الأوساط: فراغ، هواء، ماء.

وبما أن دراسة الأسطح الفلزية مهمة فيما يتعلق بمشكلات التآكل والتأكسد، وبشكل خاص مشكلات التحفيز، فلقد تم فحص الكثير من الفلزات الأخرى. ونذكر

منها، الذهب، الفضة، الألومنيوم، النيكل، النحاس، إلخ. فى أغلب الحالات، كان من الممكن الحصول على حدة التمييز الذرية، لكن بصعوبات أكثر مما فى حالة أشـــباه الموصلات، التى تمثل طوبوغرافية سطح أكثر خشونة بكثير.

لقد تم الحصول على حدة التمييز الذرية لهـــذه الفلـــزات. بالنـــسبة للـــذهب Au (١١١) على سبيل المثال، نرى فى الشكل (٢ أ) الذرات مكونة تركيبًا سداسى الشكل على السطح يتركب عليه شريط متعرج. وقد نشأ هذا الشريط من إعادة بناء جزئية للسطح بواسطة ذرات ذهب من الطبقة الأحادية الأخيرة.



الشكل (٢ أ)

على اليسار، سطح الذهب (١١١) Au كما يبدو من خـــلال المجهريـــة النفقية، نشاهد ذرات الذهب مكونة تركيبًا سداسى الشكل يتركـــب عليـــه شريط متعرج. حجم هذه الصورة ٠,٠١٥ μ متر × ٠,٠١٥ μ متر.

شكل (٢ب): على اليمين، تتشكل كريات الكوبالت فى أماكن تغير اتجـــاه الخطوط المتعرجة. على هذه الصورة الذى يبلغ طـــول ضـــلعها ٠,١ μ متر، تنتظم الكريات فى صفوف مرتبة تمامًا.

(V. Repain, S) Rousset, J. – M.Berroir, Groupe de physique des Silides, CNRS, France

باستخدام هذا السطح كركيزة، يمكن إذن تحضير تركيبات منظمة لا تتعدى واحد على المليار من المتر، بأن يرسب عليها مثلاً ذرات كوبالت. تتجمع الذرات المترسبة على شكل كريات فى أماكن تغير اتجاه الخطوط المتعرجة. وتكون بذلك تركيبًا ذاتى التنظيم على السطح شكل (٢ب). إن الخواص المغناطيسية لهذه الكريات يمكن أن تستخدم كـ " بيتات" معلومات فى ذاكرات التخزين المغناطيسية ذات الكثافة العالية جدًا.

ذرات وجزيئات مترسبة. معالجة

إن التطبيقات الأكثر شيوعًا للمجهرية النفقية فى الهواء أو فى سائل تخص بلا أدنى شك البيولوجيا. فإمكانية مراقبة الجزيئات الضخمة (الدنا، البروتينات، المواد الشحمية...) والفيروسات، إلخ. التى امتزت على سطح موصل (ذهب أو جرافيت) هى أحد الأسباب الرئيسية للاهتمام الكبير الذى تثيره هذه التقنية الجديدة بين علماء الفيزياء، وأيضًا بين علماء البيولوجيا.

لقد تم الحصول على الصور الأولى لجزئى الدنا (A D N)على نسخ مطابقة لمركبات دنا- بروتين (Rec A - ADN)، تم الحصول عليها بواسطة الصقل عند درجات حرارة شديدة البرودة، وغطيت بغشاء موصل (بلاتين - اريديوم - كربون). وتضعف هذه المعالجة كثيرًا من البنية الجزيئية، ولا تسمح إلا بحدة تمييز لا تتجاوز ١٠ نانومتر. بعد ذلك، أمكن مشاهدة الشكل الطبيعى لجزيئات الدنا (ADN) على ركيزة من الذهب، مباشرة (بدون نسخة مطابقة) بمساعدة مجهر نفقى يعمل فى الهواء وحتى فى الماء. لقد تمكنا حتى من كشف قواعد الأدنين على دنا (ADN) اصطناعى (بولى أ Poly A). إن هذه النتائج تجعلنا نأمل أنه سيكون ممكنًا يومًا " قراءة " جزئ الدنا ADN (أو الرنا ARN) بواسطة المجهرية النفقية، لكن حتى يحين ذلك لا يزال هناك العديد من المشكلات التى يتعين حلها.

لقد تم فحص نظم أخرى تهم أكثر علماء فيزياء المادة "الرخـوة" وعلمـاء الكيمياء. ونذكر ذرة أكسجين على زرنخيد الجاليوم GaAs، وجزئ أفثالوسـيانين النحاس على سطح من النحاس.

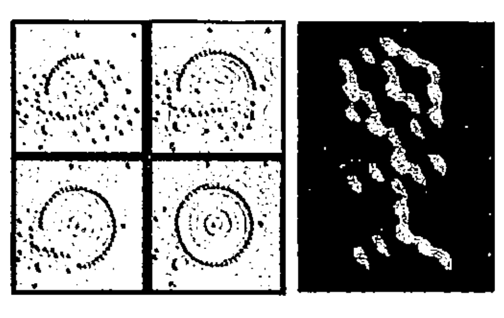
كما أجريت دراسات أخرى توضح إمكانية إجراء إرشاد موضعى لتفاعـل كيميائى. تصطاد الرأس جزيئًا متحركًا على سطح العينة، يمكن بعد ذلك نقل هـذا الجزئ وإحضاره فوق الموقع الذى نرغب فى جعله يتفاعل عنده، وبواسطة نبضة جهد، يمكن فكه من الرأس ليتفاعل حيث نريد له.

لقد تمكنا، باستخدام المجهر النفقى الذى يعمل عند درجة حرارة منخفـضة، من اصطياد ذرة بواسطة الرأس، ونقلها على دعامة فلزية من النيكل ووضعها بعد ذلك فى وضع محدد. وبالتالى يمكن أيضًا كتابة حروف بواسطة الذرات، بل وحتى تصوير أشكال هندسية. على سبيل المثال، يمكن فى الشكل (٣ أ) رؤية المراحـل المختلفة لتكوين فناء من ذرات الحديد على سطح من النحاس. هذا الفناء له خواص كمية لافتة للنظر تم رصدها مؤخرًا. فى الشكل (٣ ب) يمكننا رؤية " رجـل أول أكسيد الكربون". وهى صورة هزلية لرجل صورت بواسطة جزيئات أول أكـسيد الكربون (CO). هذه المعالجات للذرات أو الجزيئات تـدفع إلـى تخيـل إنجـاز مجموعة من الأدوات الإلكترونية التـى تعمـل بواسـطة ذرة واحـدة أو جـزئ (الإلكترونيات الجزيئية). فى عام ١٩٩١، أنتج عالم فى IBM بكاليفورنيا، عاكـسًا للتيار مستخدمًا معالجة ذرة وحيدة. ربما قد نكون على أعتاب الإلكترونيات النانوية (نسبة إلى النانو أى واحد على المليار) التى ستحل محل الإلكترونيات الميكرويـة الحالية.

تطبيقات المجهرية النفقية فى التكنولوجيا:

حتى الآن، كانت نتائج المجهرية النفقية المذكورة فيما سبق تتعلـق برصـد سطح ذى أبعاد صغيرة، لأن الذى كان مطلوبًا هو حدة التمييز الذرية فقط. يمكننـا

الآن تخيل أسطح ذات مقياس كبير، وقياس صور جانبية ثلاثية الأبعاد لسطح في مجموعة من ٠,٠١ μ متر الى ١٠ μ متر. وتظل حدة التمييز الرأسية للمقاييس الجانبية بهذا الحد أفضل من ١ نانومتر.



شكل (٣)

تركيبات ذرية وجزيئيه اصطناعية (أنجزها فريق D.M. Eigler بشركة IBM مركز أبحاث Almaden بالولايات المتحدة http:/www.almaden.ibm..com/vis/stm/).

(أ) على اليسار: أربع مراحل مختلفة لخلق فناء انطلاقًا من ذرات حديد مرسبة على سطح من النحاس (M.F. Grommie,C.P. Lutz, D.M. Eigler)

(ب) على اليمين: "رجل أول أكسيد الكربون" رسم هزلى لرجل تم تمثيله بمساعدة ذرات أول أكسيد الكربون CO (P.Zeppenfeld, D.M. Eigler).

كانت إحدى أول التطبيقات الصناعية هى قياس الصورة الجانبية لشبكة حيود، ويستخدم المجهر النفقى حاليًا كمرشد لصنع الشبكات. كما تم أيضًا تمييز الرؤوس القارئة للأفلام المغناطيسية، وكذلك الأفلام نفسها. كما يتم التحكم فى إنتاج الإسطوانات المدمجة بواسطة المجهرية النفقية إلخ.

توضح هذه الأمثلة كيف يمكن تحليل وتوجيه بعض عمليات التصنيع بواسطة المجهرية النفقية لتأمين مراقبة الجودة. وكلما أصبحت الأشياء أصغر

أصبحت المجهرية النفقية فعالة، بينما بلغت تقنيات المراقبة الأخرى حدها الأقصى لحدة التمييز منذ وقت طويل.

لقد نفذت الطباعة على الحجر (lithographie) بمقياس النانومتر بواسطة مجهر نفقى: إن خطوطًا عرضها ٢ نانومتر أمكن إنجازها بواسطة رأس نفقية تعمل بالبث المجالى. إن مثل هذه التطبيقات فى ذروة التطور وتتنوع بشكل مستمر.

المجهر ذو القوة الذرية

المبدأ

إن المجهر ذا التأثير النفقى لا يسمح بشكل عام بإعطاء صورة إلا للأسطح الفلزية ولأسطح أشباه الموصلات. فمبدئيًا، لا يمكن إعطاء صورة للأسطح العازلة بما أن التيار الكهربى لا يمكن أن يمر بين الرأس والمادة العازلة.

فى عام ١٩٨٦، اخترع كل من ج.بينيج (G.Binnig) و س.ف.كوات (C.F.Quate) وس. جيربيه (C.Gerber) المجهر ذا القوة الذرية. ويرتكز مبدؤه على قياس قوة التفاعل بين طرف الرأس وذرات السطح. وترتبط الرأس بذراع رافعة وتنتقل العينة هنا أمام الرأس. وعندما تتواجه ذرتان (ذرة الرأس وذرة السطح)، فإنهما تتجاذبان بتفاعل فان دير فال (Van der Waals)، فى الحيز بين ذرتى السطح، تكون قوة التجاذب أقل. وبقياس انحراف ذراع الرافعة، نحصل على مقياس مباشر للقوة بين الرأس والركيزة. يمكن قياس انحراف ذراع الرافعة بواسطة تأثير النفق، بالتداخل الضوئى أو بشكل أبسط انحراف حزمة ليزر، منعكسة على مرآة موضوعة خلف ذراع الرافعة. تسقط الحزمة المنعكسة على صمامين ثنائيين حساسين للضوء متفرعين ومتقابلين فى دائرة كشف إلكترونية: يعطى أى انحراف صغير للحزمة إشارة تفاضلية قابلة للقياس بسهولة. لقد أمكن رصد قوى ضعيفة لا تزيد عن $١٠^{٩}$ نيوتن.

تطبيقات المجهر ذى القوة الذرية

إن مجال تطبيق المجهر ذى القوة الذرية أوسع من مجال المجهــر النفقــى. ولا يكف عن الاتساع. ومن ثم فإن هذه المجهرية تنافس حاليًا المجهريــة النفقيــة، ويجرى فى كثير من الأحيان فحص سطوح الفلزات أو أشباه الموصلات فــى آن واحد بواسطة هاتين المجهريتين. إن المعلومات المسجلة على الــصور لا تكــون دائمًا واحدة، ويمكن بهذه الطريقة الحصول على معرفة أكثر تفصيلاً عن الــسطح. ويتم الحصول على حدة التمييز الذرية مع المجهر ذى القوة الذرية بالنسبة لأشــباه الموصلات والفلزات أيضًا. غير أن، مجال التطبيق المفضل للمجهرية ذات القــوة الذرية يتعلق بالبيولوجيا، لأن الأجسام البيولوجية، ذات الحجم الكبير نسبيًا، بحــدود الميكرومتر، تكون عامة عازلة. لقد تمكنا، مثلاً، من الحصول على صورة كريــة دم حمراء وكرية دم بيضاء، وبلّورة حمض أمينى، وجزيئات كولاجين.

إن التطور الحالى لهذه المجهريات، يتجه بعد التغلب على عدد من العراقيل التقنية، نحو الديناميكية. إن الحصول على صورة طوبوغرافية لــشبه موصــل أو فلز، بانتقال الرأس فوق السطح، كان يتطلب حوالى دقيقة لكل المجاهر الموجــودة فى نهاية التسعينيات من القرن العشرين. إذ يتعين فى الواقع تسجيل قيمة تيــار أو قياس قوة فوق السطح لكل وضع جانبى للمجــس. فــى عــام ١٩٩١، أصــبحت المجاهر الجديدة سواء النفقية أو ذات القوة الذرية اللاتى تم بناؤهــا فــى معامــل الأبحاث أسرع بكثير، إذ صارت تسمح بإعطاء صورة فى أقل من ثانية. إذا حدثت ظاهرة بطيئة نسبيًا على السطح الجارى فحصه، يمكن إذن تصويرها عمليًا بالتقاط صور متتالية كل ثانية مثلاً، مما يتيح تصوير انتقــالات أجــسام مجهريــة علــى الأسطح.

على سبيل المثال، أمكن تصوير دخول فيروس فى خلية، بواسطة مجهر ذى قوة ذرية. كما أمكن بواسطة مجهر نفقى تسجيل حركة جزيئات كبيرة تم ترســيبها على سطح الجرافيت، إلخ.

مجهريات أخرى ذات مجس موضعي

بعد اختراع هذين المجهرين، تم اقتراح العديد من البدائل. يمكن تسمية هـذه الفئة الجديدة من الأجهزة مجاهر ذات مجـس موضـعي أو SXM (بالإنجليزيـة Scanning X- microscope، حيث X يمكن أن تمثل أى نوع من التفاعـل بـين رأس دقيقة وعينة تجرى محاولة دراستها). يتم تحريك الرأس، بواسطة خزفيـات ذات كهربية إجهادية (أنبوب إسطوانى، بشكل عام)، فوق السطح المطلوب فحصه، على مسافة عشرات النانومتر من هذا السطح، ويمكن ملء الحيـز الفاصـل بـين الرأس والسطح بأى غاز أو سائل.

بهذا المفهوم، نذكر مجهرين جديدين:

سنوم SNOM:

فى حالة المجهرية SNOM (اختصار إنجليزى لـ Scanning Near Field Optical Microscope)، يتم استخدام خواص أن المجال الكهرومغناطيسى يزيـد موضعيًا على الأجزاء المنحنية لسطح. لندرس ليفة بصرية تنتهى بـشكل مـدبب، وبحيث يستطيع الضوء أن ينتقل أو ينعكس من خلال فتحة أقل من ٢٥/λ حيث λ هى الطول الموجى للمصدر. وبما أن كثافة الطاقة تتغير مع المسافة وثابت العازل الكهربائى فى ما وراء الفتحة، فإن شدة الضوء المنتقل أو المـنعكس تتغيـر مـع طوبوغرافيا العينة وتكوينها. ورغم أن حدة تمييز هذا المجهر ليست بجـودة حـدة تمييز المجهر النفقى - فهى بحدود من ١٠ إلى ٢٠ نانومتر - فإن هذا النوع مـن المجاهر يكون مفيدًا جدًا لدراسة التفاعلات البصرية عند مقياس النانومتر، ولـيس فقط دراسة طوبوغرافيا الأسطح.

SICM

فى الحالة الثانية هـذه (بالإنجليزيـة - Scanning Ion – Conductance Microscope)، يسمح مجهر ذو مواصلة أيونية، تم تطويره فـى جامعـة سـانتا

باربرا – بكاليفورنيا، بإظهار صور لطوبوغرافيا الأسطح غير الموصلة المغطاة بالكتروليت[٧٢] (électrolyte). فى هذه المجهرية الخاصة، يكون المجس عبارة عن ماصة مجهرية مملوءة بالكتروليت.

ويتوقف جريان الأيونات عبر فتحة عند مسافة قصيرة بين المجس والسطح، جاعلاً بذلك المواصلة الأيونية محدودة. وتسمح أداة ضبط بالحفاظ على مواصلة معينة تحدد فى المقابل المسافة إلى السطح. وهكذا يتم الحصول على صورة طوبوغرافية لسطح ما. يستطيع هذا النوع من المجاهر، مثلاً، تحديد تيارات أيونية عبر قنوات غشائية والسماح بالحصول على صورة جيدة لتوزيع هذه القنوات. ويتعلق الأمر بتطبيق أساسى بالنسبة للبيولوجيا.

مجهريات أخرى

لقد رأت النور فى السنوات الأخيرة مجاهر أخرى ذات مجس موضعى ماسح:

- المجهر ذو القوة المغناطيسية، حيث المجس (رأس من مادة مغناطيسية) فى حالة تفاعل مع المجالات المغناطيسية للسطح يسمح بتحليل بنية عينة مغناطيسية.
- المجهر المنتج لقوة كهربية، حيث تقاس لكل وضع للرأس السعة الكهربية بين الرأس والسطح بطريقة الرنين ويمكن إذن تحليل التوزيع الموضعى للشحنات الكهربية على سطح ما.
- المجهر ذو المجس الحرارى، الذى يسمح بتحليل موضعى لحرارة العينة، إلخ.

---

(٧٢)سائل موصل يتحلل كهربيًا عادة. (المترجم)

عشرون عامًا بعد ذلك.. استنتاجات وآفاق

منذ عام ١٩٨٢، ولدت مجهرية جديدة أو بالأصح مجاهر تكشف أشـياء لا تتعدى أبعادها النانومتر، وقد أدت إلى وجود مجموعة كاملة مـن المجـاهر ذات مجس موضعي. لقد أثبتت المجهرية النفقية قدرتها على دراسـة تركيبـات تقـاس بالنانومتر في العديد مـن مجـالات العلـم والتقنيـة. أولاً، إن دراسـات أشـباه الموصلات، وتلامس فلز - شبه موصل، ومشكلات نمو بلّورة على سطح بلّـورة أخرى بحيث يكون نمو البلّورة المترسبة موجها ببنية القاعدة، بحدة تمييز ذريـة أو بمقياس أكبر، توضح أهمية المجهرية النفقية في مجال الإلكترونيات الميكروية. إن دراسة الفلزات تتطور حاليًا بسرعة، ويتم تناول مشكلات معالجة أسطح المعـادن بالفوسفات قبل دهنها، كذلك مشكلات الأكسدة أو التآكل. كما تبـدأ أيـضًا دراسـة تراكمات فلزية صغيرة، وهي دراسة مهمة بالنسبة للتحفيز غيـر المتجـانس. إن المشكلة هنا هي ربط التفاعلية الكيميائية والبنية الذرية للتراكمات. وإلى جانب كـل مشكلات البنية هذه، فإن الاتجاه حاليًا هو إنتاج مجاهر متزايدة السرعة مـن أجـل دراسة السمة الديناميكية. إن كل مشكلات الانتشار السطحي والتفاعلية الكيميائيـة عند السطح تكمن في إمكانية جعلها مرئية.

من ناحية أخرى، يتعلق الاتجاه المهـم الأخـر بالكيميـاء تحـت الـرأس والتطبيقات في البيولوجيا. ويمكن في الواقع جعل جزئ مرئيـا، ونقلـه، وجعلـه يتفاعل موضعيًا بفضل التفاعل مع الرأس. إن جعل الجزيئات البيولوجية وبعـض البروتينات وبعض الفيروسات مرئية بحدة تمييز ذرية باستخدام سواء المجهـر ذي التأثير النفقي، أو المجهر ذي القوة الذرية، يشكل مجالاً مستقبليًا. فضلاً عن ذلـك، وفيما وراء التركيب، يمكن تصور إمكانيـة جعـل ديناميكيـة بعـض العمليـات البيولوجية مرئية بمقياس ما دون الميكرون[٧٣] وذلك وفقًا لمـا أوضـحته بعـض التجارب التمهيدية.

---

(٧٣) الميكرون يساوى واحد على مليون من المتر.

إن إمكانيات المجهرية ذات المجس الموضعي ضخمة، ولا تزال بعيدة عـــن الحدود النظرية (الكمية) لتصغير الحجم. إننا بلا شك على أبواب ثورة صناعية لما لا يزيد حجمه عن واحد على مليار من المتر (النانو).

عالم البرودة الغريب:
على حدود الصفر المطلق[٧٤]

بقلم: هنرى جودفرين

Henri GODFRIN

ترجمة: لبنى الريدى

درجة حرارة وحدس...

ما البرودة؟ لدينا جميعا إجابة على هذا السؤال، لأن حواسنا تسمح لنا باكتشاف الاختلافات الطفيفة جدًا فى درجة الحرارة وبدقة ملحوظة. لقد اعتدنا على استخدام مقاييس الحرارة المدرجة بعناية إلى درجات سلسيوس، سواء نحو درجات الحرارة الموجبة أو السالبة. ورغم أن هذه الدرجات لا تغطى سوى مجموعة صغيرة، من -٢٠°م إلى +٤٠°م، فإن كل شىء يدفعنا إلى الاعتقاد أننا نستطيع مد هذه الدرجات إلى مالا نهاية نحو درجات حرارة لانهائية فى الاتجاهين. لكن، لو كان صحيحًا إمكانية تسخين جسم ما دون حدود، وذلك بتزويده بطاقة قدر ما يحتاج الأمر، فإن الفيزياء توضح لنا أن الهبوط نحو درجات الحرارة المنخفضة يصطدم بعائق لا يمكن التغلب عليه: ألا وهو الصفر المطلق.

كان الفيزيائى الفرنسى جبيوم أمونتون (Guillaume Amontons) (١٦٦٣- ١٧٠٥)، هو أول من حاول أن يطرح بشكل واضح السؤال عن وجود حد أدنى لمقياس درجات الحرارة. لقد كان عبقريًا فى إجراء التجارب، وتوصل إلى نتيجة مذهلة: يصبح ضغط الغازات صفرًا عند درجة حرارة يقدرها عند قيمة توازى -٢٤٠ من درجات سلسيوس. وهو ما يمثل دقة مدهشة بالنسبة لذلك الزمن!

---

(٧٤) نص المحاضرة رقم ٢٢٨ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٥ أغسطس ٢٠٠٠.

ولم يتم استخلاص الخطوط العريضة لعلم الحـــرارة، الـــديناميكا الحراريـــة (Thermodynamique)، إلا فى القرن التاسع عشر. ولقد تم استنتاج قوانين هـــذا العلم، المسماة "مبادئ"، من خلال التجربة. كما أسهمت الديناميكا الحرارية أيـــضًا فى حل مشكلة درجات الحرارة المنخفضة جدًا: لقد أدخل كـــارنو (Carnot) فـــى كتابه تأملات فى القوة المحركة للنار والآلات الصالحة لتطوير هذه القوة، المنشور عام ١٨٢٤، مفهوم الحرارة المطلقة T. ويرتبط الصفر فى هذا المقياس لـــدرجات الحرارة، الصفر المطلق، بالكفاءة القصوى للآلات الحرارية: تكون هـــذه الكفـــاءة ١٠٠ ٪ إذا كان المصدر البارد عند درجة حرارة صفر =T.

درجة الحرارة المطلقة
ودرجة التعادل الحرارى (الإنتروبيا)

يستخدم الفيزيائيون الآن مقياس درجات الحرارة المطلقة الذى اقترحه ولـــيم طومسون (لورد كلفـــن Lord Kelvin) عـــام ١٨٤٨. ويحـــدد الـــصفر المطلـــق (صفر=T) هذا المقياس كما يحدد قيمة ٢٧٣,١٦ درجة التى ينسب إليهـــا النقطـــة الثلاثية[٧٥] للماء، وهى درجة الحرارة الوحيدة التى يتواجد عندها معًا الثلج والمـــاء والبخار، وهى توازى درجة حرارة ٠,٠١ درجة مئوية. وتتطابق درجة الحـــرارة من المقياس الجديد (درجة كلفن) مع درجة سلسيوس، غير أن نقطة بداية المقياسين بينهما فرق ٢٧٣,١٥ درجة: ومن ثم يعبر ببساطة عن درجة الحرارة الكلفنية (T) نسبة إلى درجة الحرارة المئوية (t) طبقًا للصيغة:

$$T\,(K) = t\,(C^{\circ}) + 273{,}15$$

ومن ناحية أخرى، أدخل وصف تبادلات الحرارة مقدارًا فيزيائيًـــا جديـــدًا: درجة التعادل الحرارى أو الإنتروبيا (entropie)، وكان كلوزيوس (Clausius) قد

---

(٧٥) درجة حرارة تتعادل عندها أطوار المادة الثلاثة. (المترجم)

أدخله عام ١٨٥٠. إن درجة التعادل الحرارى تميز حالة المادة، حيث يعادل تزويد جسم ما بالحرارة زيادة درجة تعادله الحرارى. وتقدم لنا الديناميكا الحرارية أيضًا مبدأ درجة التعادل الحرارى القصوى: لا تستطيع درجة التعادل الحرارى لنظام معزول إلا أن تزيد أو أن تظل ثابتة، وهو ما يحدد تطور نظام فيزيائى غير متوازن، وبالتالى، يتم إدخال تمييز بين اتجاهى الزمن: على نقيض قوانين الميكانيكا، لم يعد الماضى والمستقبل متماثلين!

غير أن الفيزياء الحرارية لا تقدم سوى وصفًا عيانيًا، أى لما يرى بالعين المجردة: إننا بعيدون جدًا عن "الذرات" كما تخيلها ديمقريطس (Democrite).

درجة الحرارة وألعاب المصادفة:
إسهام علم الإحصاء

لكن، بفضل أعمال كل من ر.كلوزيوس (R. Clausius) وج.ماكسويل (J. Maxwell) ول. بولتزمان (L. Boltzmann)، بدأت النظرية الحركية للغازات تستقر تدريجيًا. إنها تفسر خواص الغازات بحركة "الجزيئات" غير المنظمة: يرجع الضغط الذى يمارسه غاز ما على إناء ما إلى العدد الكبير جدًا من تصادمات جزيئاته مع جدران الإناء، وتصبح درجة الحرارة مقياسًا للطاقة المتوسطة للجزيئات.

ولا يمثل مصير الجزئ الفردى أية أهمية عندما نبحث عن وصف الخواص التى ترى بالعين المجردة لجسم ما. لكن الفيزياء الإحصائية، التى طورها ل.بولتزمان (L. Boltzmann) فى ظل التشكك العام، ستحقق الإنجاز الباهر، ألا وهو ربط السلوك العيانى لجسم ما بالخواص المجهرية الخفية. والمثال الباهر على ذلك هو الحصول على معادلة حالة الغاز المثالى، $P V = N R T$.

ويعتبر فهم أصل الإنتروبيا أو درجة التعادل الحرارى أحد المكتسبات الأساسية للفيزياء الإحصائية. ونظرًا لوجود عدد كبير من الجزيئات تستطيع

احتلال عدد كبير من الأوضاع، فإنه يوجد عدد كبير جدًا من الأشكال الممكنة بالنسبة لإجمالى النظام، ويزيد هذا العدد كلما زادت الطاقة الكلية التى يتم توزيعها بين الجزيئات. ويمكن حساب عدد هذه الأشكال عن طريق التحليل التوافقى. ويكون هذا العدد كبيرًا جدًا بحيث نضطر إلى أن نأخذ فى الاعتبار لوغاريتمه! إن الإنتروبيا أو درجة التعادل الحرارى هى إذن مقياس لكمية الحالات المجهرية التى يمكن للنظام الوصول إليها. وبتعبير أكثر شيوعًا سنقول إنها تقيس الفوضى!

ثورة ميكانيكا الكم

إن قدوم ميكانيكا الكم، التى طورها م. بلانك (M. Plank) ون.بوهر (N. Boher) وو.هيزنبرج (W. Heisenberg) وب. أ. م. ديراك (P.A.M. Dirac) وآخرون، سيسمح بتحقيق تقدم جديد للفيزياء الحرارية، مع الاعتماد وبقوة على هذه الفيزياء. إن المادة لا توجد إلا فى حالات "محددة كميًا"، وتتميز بعدد صحيح يسمى العدد الكمى، ومن ثم تكون هذه الحالات منفصلة من حيث الطاقة. وتقدم هذه الحالات الكمية، المماثلة لحالات الإلكترون حول ذرة ما، الأداة المثالية لإجراء الحسابات الإحصائية. فى الواقع إن ما نرصده ينتج عن متوسط لعدد يفوق التصور من الأشكال "حالات" المجهرية. إن درجة الحرارة هى مقدار مرتبط بـ"إعمار" هذه الحالات الكمية بواسطة الجزيئات. ويحسب احتمال العثور على جزئ فى حالة طاقة E بواسطة معامل بولتزمان (Boltzmann:exp $[-E / K_BT]$): كلما كانت الحرارة T مرتفعة، كانت لدينا فرص العثور على جزئ فى حالة طاقة E مرتفعة. ويسمح ثابت بولتزمان (Boltzmann K_B) بمقارنة درجة الحرارة T بطاقة مميزة للمشكلة. على سبيل المثال، يحدث انصهار جسم ما عندما يكون K_BT بحدود E_0، وهى طاقة ترابط ذرات هذا الجسم. يرتبط بكل نطاق طاقة نطاق درجة حرارة.

وتجلب ميكانيكا الكم تنويرًا جديدًا لمشكلة الصفر المطلق. ففى الحقيقة، من بين كل الحالات الكمية، توجد حالة تهمنا إلى أعلى درجة: إنها حالة الطاقة الأدنى،

المسماة "الحالة الأساسية". فى هذه المرحلة، لا تعد المادة قادرة على التخلى عن أية طاقة: لا توجد أية حالة طاقة أدنى! ولا يعنى ذلك إطلاقًا أن طاقتها تكون صفرًا. وتستمر الحركة تدب فى الجزيئات: وتبقى طاقة تسمى طاقة "النقطة صفر"، التى يمكن ربطها بمبدأ عدم اليقين لهيزنبرج (Heisenberg) الخاص بميكانيكا الكم.

الصفر المطلق والإثارات الأولية

تتطابق إذن درجة حرارة الصفر المطلق مع الوضع الذى تكون فيه المادة فى الحالة الأساسية. لكن عندما لا يتبقى سوى اختيار واحد ممكن لا يعتبر هناك أية فوضى. وعلى نقيض الاعتقاد الذى كان سائدًا فى بداية القرن العشرين، فإن درجة التعادل الحرارى (الإنتروبيا) هى التى تصبح صفرًا وليست الطاقة.

وبطريقة ما، فإن فيزياء درجات الحرارة المنخفضة هى إذن فيزياء النظام. كما أنها تسمح بفهم كل المجموعة الغنية من التأثيرات الحرارية. فى الواقع، لو تركنا جانبًا حالة الغاز المثالى المدرسية بعض الشىء، سنواجه على الفور المشكلة المعقدة للذرات أثناء تفاعلها. لندرس مثلاً حالة جسم جامد بسيط. تتلخص حركة الذرات فى ذبذبات صغيرة حول وضعية توازنها. رياضيًا، تكافئ هذه المسألة مجموعة من البندولات، أو "مولدات ذبذبات توافقية". غير أن طاقة هذه البندولات مكممة! عند درجة حرارة صفر، ستخضع لاهتزازة النقطة صفر الكمية الأصل. وعند تسخين النظام، يتم زيادة درجة اهتزاز الذرات. لقد جعل أينشتاين الفيزياء تحقق تقدمًا ضخمًا عندما اقترح نموذجًا للجوامد يصف خواصها الحرارية بواسطة مجموعة من مولدات ذبذبات توافقية مستقلة ومكممة: لأول مرة يتم فهم الأصل الكمى لتناقص السعة الحرارية للأجسام عند درجة الحرارة المنخفضة. إن هذا المقدار، الذى يتطابق مع كمية الحرارة التى يتعين تزويد جسم بها لرفع درجة حرارته درجة واحدة، يخبرنا عن طاقة الحالات الكمية للمادة. ويجب أن يميل هذا

المقدار نحو الصفر عند درجة الحرارة المنخفضة، مثلها مثل الإنتروبيا، وهو تمامًا ما تم رصده تجريبيًا.

المادة عند درجة الحرارة المنخفضة

إن نموذج أينشتاين ينطبق على مولدات ذبذبات مستقلة، فـي حـين تكـون ذبذبات الذرات في عدد كبير جدًا من الأجسام الجامدة مزدوجة وبقوة. يحدث كـل شيء كما لو كانت الذرات كتلاً صغيرة مرتبطة فيما بينها بـ"يايات"، وترمز هـذه اليايات للقوى الذرية. واستطاع ديبى (Debye) أن يبـين أن الموجـات الـصوتية المكممة،"الفونون"، تمثل "الإثارات الأولية" لجسم جامد.

وتعتبر الخواص الإلكترونية للمادة أيضًا مجال أبحاث مثمر جـدًا. وإحـدى النتائج الأكثر إبهارًا هي ظهور التوصيلية الفائقة في بعض الفلزات.[٧٦] في الواقع، تستطيع الإلكترونات، عند درجة حرارة منخفضة، أن تشكل أزواجًا (أزواج كـوبر Cooper) و"تتكثف في حالة عيانية متماسكة": تتصرف كل إلكترونـات التوصـيل للفلز "دفعة واحدة"، مثل جزئ عملاق. ولم تعد شوائب وعيوب الفلز، التي كانـت تحدث مقاومة كهربية في الحالة "الطبيعية"، قادرة على وقف هذا "الشيء الكمـي" العملاق الذي أصبحت عليه الإلكترونات فائقة التوصيل: ويمر التيار دون تبديـد. وأمكن إثبات أن التيار الذي يدخل فخ حلقة فائقة التوصيل سيستمر فـي الـدوران دون أن يضعف لسنوات طويلة!

وتستطيع أن تقدم إلكترونات فلز أو شبه – موصل، عند درجـة الحـرارة المنخفضة، خواص مدهشة أخرى كثيرة، على سبيل المثال، "تأثير هـول الكمـي الكامل"، أو"تأثير هول الكمي الجزئي"، أو "التحول فلز – عازل"، أو "انسداد كولوم Coulomb".

---

(٧٦) راجع بالنسبة لهذا الموضوع المحاضرات الـ٢٢٠ والـ٢٢٣ لجامعة كل المعارف التي ألقاها على التوالي إ.بريزين (E.Brézin) وس.باليبار (S. Balibar).

كما أن البرودة مثيرة للاهتمام أيضًا لدراسة الظواهر المغناطيسية. ترجع هذه الظواهر لوجود "لف ذاتي" مرتبط بالإلكترون، أي دوران الإلكترون حول نفسه. ومن ثم يتصرف الإلكترون كمغناطيس أولي صغير، وسيكون ميالاً لأن يصطف مثل بوصلة تبعًا لمجال مغناطيسي ما. إن الفوضى التي تفرضها الحرارة تتعارض مع هذا الاصطفاف. وبالتالي نرى الخواص المغناطيسية للأجسام تتطور وفقًا لدرجة الحرارة والمجال المغناطيسي. عند درجة الصفر المطلق، ينظم "اللف الذاتي" نفسه ليشكل تكوينات مغناطيسية منظمة مختلفة: تكوينات ذات مغناطيسية حديدية، وذات مغناطيسية حديدية مضادة، وتكوينات حلزونية، إلخ.

إن دراسة نظيري الهليوم: ^4He و^3He هو المجال المفضل لدرجات الحرارة المنخفضة. يدخل الهليوم ^4He في فئة الـ"بوزونات"، التي تجمع كل جسيمات الطبيعة التي يكون لفها الذاتي رقمًا صحيحًا (صفر، ١، ٢، إلخ.)، لأن له لف ذاتي صفري. وعلى النقيض، فإن الهليوم ^3He جزء من الـ"فرميونات"، لأن له لف ذاتي ١/٢. لقد تم الاستعانة مجددًا بميكانيكا الكم عند محاولة وصف خواص مجموعة من هذه الذرات،التي تحققت عمليًا من خلال الهليوم السائل. في الواقع، يتم الحصول على الحالة الأساسية للبوزونات بوضع كل الذرات في الحالة الكمية نفسها. ويتم الحصول، بالنسبة للهليوم ^4He، على حالة عيانية متماسكة مماثلة للتوصيلية الفائقة لأزواج كوبر (Cooper) الإلكترونية. وترصد الميوعة الفائقة للهليوم ^4He السائل تحت درجة حرارة ٢,١٧ كلفن:إنه ينساب عندئذ دون أية علامة على احتكاك أو لزوجة، حتى أنه يرتفع على امتداد جدران الإناء الذي يحتويه!

إن الهليوم ^3He يتصرف بطريقة مختلفة تمامًا. ففي الحقيقة لا تستطيع الفرميونات أن تتواجد في الحالة نفسها(يسمى هذا الحظر الكمي "مبدأ الإبعاد لباولي Pauli". إذن تكون الذرات العديدة التي يضمها حجم معين من الهليوم ^3He السائل، بالضرورة، في حالات كمية مختلفة. فإذا نجحت الذرات أن تستقر في حالات ذات طاقة منخفضة، فإن الأمر يؤول بالذرات الأخرى إلى أن تحتل مستويات أكثر

طاقة باطراد: وهكذا يتم شغل الحالات حتى "مستوى فيرمى Fermi". ونجد هـذه الفيزياء مجددًا فى الفلزات، لأن الإلكترونات هى أيضًا فرميونـات. ولـذلك فـإن الدراسات التى أجريت على الهليوم^{3}He السائل أتاحت فهمًا أفضل لفيزياء الفلزات.

سيكون مجحفًا ألا نذكر هنا إحدى أجمل تأثيرات فيزياء درجـات الحـرارة المنخفضة: ألا وهى الميوعة الفائقة للهليوم ^{3}He، التى رصـدها د. د. أوشـيروف (D.D.Osheroff) ور. س. ريتشاردسون (R.C.Richardson) ود. لى (D.Lee)، الحاصلون على جائزة نوبل للفيزياء. تـشكل ذرات الهليـوم ^{3}He، مثلهـا مثـل الإلكترونات، أزواج كوبر (Cooper) التى تتكثف لتسبب حالة الميوعة الفائقة. إن الدراسات التى أجريت على هذا النظام سمحت بفهم الخواص التى تم رصدها بعـد ذلك بعشرين عامًا فى "الموصلات فائقة التوصيل عند درجـة الحـرارة العاليـة الحرجة". لقد تم توضيح حالات تشابه أخرى، ربما تكون أكثر إثارة للدهشة، مثـل وصف تكوين الأوتار الكونية فى الكون البدائى انطلاقًا من تجارب أجريت علـى الهليوم ^{3}He الفائق الميوعة عند درجة حرارة فائقة الانخفاض. فى الواقع، لقد تـم وصف نسق مادة الكون بعد الانفجار الكبير بواسطة حالات تماثل مشابهة لحـالات تماثل الهليوم ^{3}He الفائق الميوعة!

الموائع ذات درجة الحرارة المنخفضة

إذا كان الهليوم يلعب دورًا مهما بالنسبة لفيزياء درجات الحرارة المنخفضة، فالشيء نفسه ينطبـق علـى التكنولوجيـا المرتبطـة بهـا: تكنولوجيـا التبريـد (Cryogénie). ففى كل معامل درجات الحرارة المنخفضة توجد خزانات تحتـوى على هليوم ^{4}He سائل. غير أن إسالة الهليوم أمر حديث نسبيًا. مـن قبـل، كـان الرواد قد فتحوا الطريق: حيث قام كاييتيه (Cailletet) وبيكتيـه (Pictet) بإسـالة الأكسجين (١٨٧٧)، وفى العام نفسه نجح كاييتيه (Cailletet) فى الحصول علـى الأزوت السائل، ثم فى عام ١٨٩٨ تمكن جيمس ديوار (James Dewar) من إسالة

الهيدروجين. وأخيرًا، فى عام ١٩٠٦ نجح هيك كاميرلنج أونيس (Heike Kammerlingh Onnes) فى الحصول على الهليوم (^4He) السائل، ورصد ميوعته الفائقة.

حاليًا، يمثل الأزوت السائل والهليوم السائل مصدرى البرودة المفضلين لدى علماء علم التبريد. عند درجة حرارة ٧٧ كلفن، يكون الأزوت السائل، تحت الضغط الجوى، فى حالة اتزان مع بخاره. وتتم معالجة السائل بسهولة، حتى وإن كان يتعين اتخاذ الحيطة لتفادى "الحروق الناجمة عن درجات الحرارة المنخفضة". وللحد من تبخره، يتم تخزينه فى أوانى معزولة حراريًا، وينقل من هذه الأوانى إلى الأجهزة التى يراد تبريدها: مثل أوعية الأزوت السائل المخصصة للتجارب، وفخاخ درجات الحرارة المنخفضة، إلخ. وأحيانًا، يكون الدافع الوحيد للتخزين عند درجات الحرارة المنخفضة هو توفير المكان، حيث إن السائل أكثر كثافة من الغاز.

لكن يطرح تخزين ومعالجة الهليوم مشكلات أكثر خطورة. ففى الواقع، لا يكون الهليوم سائلاً إلا عند درجة حرارة ٤,٢ كلفن (فى حالة اتزان مع بخاره، تحت الضغط الجوى). فضلاً عن أن الحرارة الكامنة لتبخره ضعيفة جدًا، وهو ما يؤدى إلى استخدام أوعية معزولة عزلاً حراريًا محكمًا. وتتكون أوعية ديوار (Dewar)، نسبة إلى مخترعها، من جدار مزدوج مفرغ من الهواء. ويصنع جدار الوعاء من مواد رديئة التوصيل جدًا للحرارة. وبفضل التقدم فى مجال علم التبريد، نجحنا حاليًا فى الحد من تبخر الهليوم من الأوانى التى يحفظ بها إلى بضعة لترات شهريًا.

التبريد إلى أدنى من واحد كلفن

لم يكتفِ كاميرلنج أونيس (Kammerlingh Onnes) بـ٤,٢ كلفن المساوية لدرجة حرارة الهليوم السائل تحت الضغط الجوى. لقد حصل سريعًا على درجات حرارة بحدود ٠,٨ كلفن، مستخدمًا مضخات قوية جدًا. فى الواقع، عند الضغط

المنخفض، يجد التوازن سائل-غاز نفسه وقد أزيح نحو درجات الحرارة المنخفضة. لكن للأسف، ينخفض الضغط بشكل أسى عند درجات الحرارة المنخفضة، ومن ثم لا تستطيع حتى أقوى المضخات، عند هذه المرحلة، أن تنتزع من السائل سوى ذرات قليلة جدًا. إن عملية تبريد الهليوم ^4He بالضخ تتعثر قرب درجة حرارة واحد كلفن!

إن أجهزة التبريد (أجهزة ترموستات الحرارة المنخفضة cryostats) المستخدمة فى المعامل تضم وعاء ديوار (Dewar) خارجى يحتوى على أزوت سائل (٧٧ كلفن)، وهو يقوم بدور أول حارس حرارى، وفى الداخل، يوجد وعاء ديوار (Dewar) ثانى يحتوى على هليوم سائل (٤,٢ كلفن). وفى قلب الهليوم السائل إناء عازل محكم السد ومفرغ الهواء، يسمى "مسعر" (calorimètre). وفى هذا الأخير سنتمكن من بلوغ درجات حرارة أكثر انخفاضًا بفضل العزل الحرارى، الذى يوفره الفراغ والسواتر المضادة للإشعاع الحرارى. ولتبريد عينة موضوعة فى المسعر، تستخدم علبة صغيرة "عند واحد كلفن"، وبواسطة أنبوب شعرى صغير يتم إدخال خيط صغير من الهليوم السائل إليها انطلاقًا من "الحمام" (أى من وعاء ديوار (Dewar) المحتوى على الهليوم). ويسمح أنبوب كبير بضخ هذه العلبة بشكل فعال للوصول إلى حوالى ١,٤ كلفن.

ويمكن استخدام الهليوم ^3He، الغالى الثمن، بفضل تقنية مماثلة. فى الواقع، تتيح ترموستات الحرارة المنخفضة الموصوفة عاليه بلوغ درجة حرارة منخفضة بما يكفى لتكثيف الهليوم ^3He الغازى، تحت ضغط ضعيف. ويتم إيصال هذا الهليوم إلى ترموستات الحرارة المنخفضة (دائرة الحقن) بواسطة أنبوب شعرى يمر فى هليوم "الحمام"، ثم يدخل فى المسعر حيث يوضع فى تلامس حرارى مع العلبة ذات الواحد كلفن لكى يتم تكثيفه. ثم يتم إدخال الهليوم ^3He الذى أصبح سائلاً فى إناء صغير حيث يتم ضخه. وتعمل أجهزة "ترموستات الحرارة المنخفضة" الخاصة بالهليوم ^3He "بطريقة مستمرة": ففى الواقع، يعاد إدخال الغاز

الذى تم ضخه فى دائرة الحقن مجددًا، بحيث يكمل الدورة. ونصل بواسطة هذه الآلات إلى درجة حرارة بحدود ٠,٣ كلفن!

هل كان يتعين أن يتوقف السباق نحو الصفر المطلق عند هذا الحد؟ لم يتبقَ مرشحون: كان للهليوم شرف أن يكون آخر عنصر يخضع للإسالة.

عندئذ اقترح هـ. لندن (H. London) فكرة مغرية: ألا وهى إذابة الهليوم ^3He فى الهليوم ^4He السائل. وبلغت النماذج الأولية للمبردات التى تعمل بهذه التقنية درجة حرارة ٠,٢٢ كلفن، وأثبت بذلك أن المبدأ يعمل بنجاح. وطور العديد من المعامل، خاصة فى جرينوبل (Grenoble) ولاجولا (La Jolla)، طرائق أتاحت الحصول على درجات حرارة بحدود ٢ ميللى كلفن وبطريقة مستمرة.

إذا كنا لا نعرف حاليًا طريقة أخرى تسمح بالتبريد المستمر، فهناك وسيلة للوصول إلى درجات حرارة أكثر انخفاضًا لكن بطريقة مؤقتة. يعتمد المبدأ الذى أعلنه ف. جيوك (F.Giauque) عام ١٩٢٦ على خواص المواد البارامغناطيسية.[٧٧] فباستخدام مجال مرتفع، يمكن مغنطة الأجسام المعنية، وهو ما ينتج انبعاثًا للحرارة، مرتبطًا بخفض درجة التعادل الحرارى (الإنتروبيا). ويقوم المجال بـ"ترتيب" النظام. ثم يعزل النظام بفك اقترانه بوسطه عن طريق "قاطع حرارى". وتظل درجة التعادل الحرارى للنظام المعزول ثابتة إذا أجرينا خفضًا بطيئًا جدًّا للمجال المغناطيسى. إذ لا يوجد إسهام حرارى، بل "شغل مغناطيسى" فقط. إن "زوال التمغنط الذى يحدث دون تبادل حرارى"، يسمح بالحفاظ على درجة ترتيب اللف الذاتى للإلكترونات. وبخفض المجال المغناطيسى تدريجيًا، وهو العامل الخارجى الذى حث على هذا الترتيب، يتم إذن الحصول على خفض فى درجة الحرارة.

---

(٧٧) مواد قابلة للتمغنط، ذات إنفاذية مغناطيسية تزيد على الواحد. (المترجم)

ويمكن بلوغ درجات حرارة أقل بكثير من ١ ميللى كلفن باستخدام اللف الذاتى النووى لبعض الذرات. يتم أولاً تبريد أسلاك النحاس التى تشكل طبقة إزالة التمغنط النووى إلى أقل من ١٠ ميللى كلفن بواسطة مبرد يعمل بذوبان الهليوم ^{3}He فى الهليوم ^{4}He السائل فى ظل مجال مغناطيسى مرتفع (٨ تسلا)[٧٨] ويعزل النظام ثم يتم إزالة تمغنطه ببطء. تسمح هذه الطريقة (إزالة التمغنط النووى دون تبادل حرارى) ببلوغ درجات حرارة متناهية التدنى: يمكن تبريد اللف الذاتى النووى إلى أجزاء من المليون من الكلفن (نانوكلفن)!

وعلى النقيض، فإن الذبذبات الذرية ("الفونون") والإلكترونات، ستظل أكثر سخونة، لأن التقارن الحرارى يصبح ضعيفًا جدًا عند درجة الحرارة المنخفضة، وتغدو عمليات دخول الحرارة الطفيلية أمرًا لا يمكن تفاديه. وسرعان ما تصبح الصعوبات كبيرة جدًا عندما يراد تبريد عينة عند درجة حرارة متناهية الانخفاض، على سبيل المثال، لقد تمت دراسة الهليوم ^{3}He الفائق الميوعة عند حوالى مائة ميكروكلفن فى لانكستر (Lancaster) وجرينوبل (Grenoble) باستخدام أكثر الأجهزة فاعلية وتطورًا.

إن طرائق مختلفة تمامًا نابعة من علم البصريات وتستخدم الليزر، أتاحت مؤخرًا التبريد لدرجات فى حدود واحد على المليون من الكلفن لغازات مخففة جدًا من ذرات السيزيوم أو الروبيديوم. لقد أثبت هذا العمل الفذ العديد من الظواهر المماثلة للظواهر التى ذكرناها بالنسبة للهليوم، مثل تكثيف بوز (Bose)، والتماسك الكمي، وتكوين دوامات مكممة، إلخ. إن هذا المجال البحثى الجديد ثرى جدًا وفى حالة تطور قوى[٧٩].

---

(٧٨) وحدة الحث المغناطيسى. (المترجم).

(٧٩) راجع فيما يتعلق بهذا الموضوع المحاضرة رقم ٢١٧ التى ألقاها Claude Cohen – Tannoudji فى جامعة كل المعارف.

القياس الحرارى لدرجة الحرارة المنخفضة

إن قياس درجة الحرارة عملية حساسة، لأنه لا يوجد أى مقياس حرارة (ترمومتر) قادرًا على إعطاء درجة الحرارة المطلقة T في كل مجموعة درجات الحرارة! وبالتالى تم وضع مجموعة أجهزة لقياس الحرارة. وتسمى هذه الأجهزة "أولية" عندما تعطى درجة الحرارة انطلاقًا من مقادير تم قياسها بشكل مستقل. إنها حالة مقياس الحرارة الغازى، الذى يقتصر للأسف على درجات الحرارة الأعلى من ١٠ كلفن، وبعض مقاييس الحرارة المغناطيسية التى تسمح بالقيام بدورات خاصة بالديناميكا الحرارية بين درجتى حرارة، ومقاييس حرارة جونسون ذات التكتكة، حيث يتم استنتاج درجة الحرارة من التكتكة الكهربية على مقاومة كهربية. وعلى النقيض، يتعين معايرة مقاييس الحرارة الثانوية نسبة إلى المقاييس الأولية. فى بعض الحالات، يمكن وضع "جداول" للخواص التى تم قياسها مما يتيح بسهولة إنتاج المقياس الرسمى لقياس درجة الحرارة. إنها حالة جهد بخار الهليوم ^{3}He والهليوم ^{4}He: إن قياس ضغط التوازن سائل – بخار يسمح بتحديد درجة الحرارة عند حوالى ١ كلفن انطلاقًا من قيم مجدولة. إن المقياس الدولى لدرجات الحرارة المعترف به حاليًا، ITS90، يحدد درجة الحرارة حتى ٠,٦٥ كلفن فقط. وفى أكتوبر ٢٠٠٠ قامت اللجنة الدولية للقياسات والموازين بتبنى مقياسًا مؤقتًا لدرجات الحرارة المنخفضة، ولقد تم تحديد هذا المقياس بواسطة منحنى انصهار الهليوم ^{3}He (PLTS2000). ويغطى هذا المقياس مجموعة درجات الحرارة التى تتراوح بين ٠,٩ ميللى كلفن وواحد كلفن.

تطبيقات درجات الحرارة المنخفضة

إن تقنيات درجات الحرارة المنخفضة تسمح بالحصول على غازات شديدة النقاء. ولذلك يكتسب النشاط الصناعى فى مجال الغازات المسالة أهمية كبيرة جدًا، خاصة فى فرنسا. ويتعلق هذا النشاط بالغاز الطبيعى والأزوت والأكسجين

والهيدروجين والهليوم، إلخ. وتستخدم الموائع المنخفضة الحرارة فى العديد من القطاعات: الإلكترونيات والتعدين والكيمياء والفضاء، إلخ. يتكون وقود صواريخ أريان خمسة، مثلاً، من أكسجين سائل وهيدروجين سائل، كما يتطلب تصنيع مكونات من أشباه الموصلات، مثل المشغلات الدقيقة لأجهزة حاسوبنا، استخدام أزوت نقى جدًا يتم الحصول عليه من تبخير الأزوت السائل.

ورأت النور مؤخرًا تطبيقات طبية متطورة. فأجهزة المسح التى تعمل بالرنين المغناطيسى النووى تستخدم مجالا مغناطيسيا تنتجه ملفات فائقة التوصيل موضوعة فى إناء من أوانى ديوار (Dewar) المحتوية على الهليوم السائل. إن عمليات حفظ الأعضاء أو الخلايا (دم، منى، إلخ) بالتبريد عند درجات حرارة منخفضة تستعمل الأزوت السائل وخزانات تخزين فائقة التبريد. كما يستخدم الأزوت السائل أيضًا فى مجال الجراحات التى تتم عند درجة حرارة منخفضة.

وتعد الأدوات العلمية الكبيرة من بين مستخدمى التبريد. سيتم تزويد مسرع الجسيمات القادم فى الـ CERN، الـ LHC، بمغناطيسات فائقة التوصيل موضوعة فى الهليوم ^{4}He فائق الميوعة، على محيط ٢٧ كيلومترًا. وقام العديد من المعامل بتركيب مغناطيسات فائقة التوصيل تهدف إلى إنتاج مجالات قوية جدًا. ونجد هذه المغناطيسات فى منشآت الاختبار الخاصة بالبلازما (Tore Supra، على سبيل المثال)، التى نأمل أن نحصل منها على مصدر طاقة للمستقبل.

إن أى جلب للحرارة، حتى ولو كان ضعيفًا جدًا، يحدث عند درجات الحرارة المنخفضة زيادة محسوسة فى درجة الحرارة. ومن هنا جاءت فكرة استخدام تقنيات التبريد لدرجات حرارة قرب الصفر المطلق لرصد الجسيمات الكونية. ويوجد حاليًا فى معامل الفيزياء الفلكية العديد من الأجهزة المسماة "بولومترية"[٨٠] (bolométrique).

---

(٨٠) هى أجهزة تقيس الطاقة الإشعاعية الحرارية. (المترجم)

وتتيح الخواص الكمية للمادة تصور معـــايير جديـــدة للمقـــادير الأساســـية والتطبيقية: إنها حالة الفولت والأوم، التى تم تعريفها وتحديـــدها بواســـطة تـــأثير جوسيفسون (Josephson) وتأثير هول الكمى، وتم إنجاز ذلك بمعدات عند درجـــة حرارة منخفضة جدًّا.

إن الأجهزة الكهروكيميائية فائقة التوصيل قادرة على أن تحقق كسبًا كبيـــرًا للطاقة مقارنة بالنظم التقليدية. وفى مجال القدرة الكهربية العاليـــة، يـــتم تـــدريجيًا تركيب المحولات ومولدات التيار المتنـــاوب ومحـــددات التيـــار علـــى الـــشبكات الكهربية. ومن ناحية أخرى، تطورت بسرعة كبيرة، منذ بضع سنوات، التطبيقات فى مجال الاتصالات اللاسلكية، خاصة على مستوى مرشحات الهواتف المحمولـــة الشديدة الانتقائية، والتى يتم إنتاجها بواسطة مواد فائقة التوصيل ذات "درجة حرارة حرجة عالية" يحتفظ بها عند درجة حرارة الأزوت السائل.

وتعتبر الحساسية العالية جدًّا، ومستوى الضوضاء الكهربية الخافت لـــبعض الأجهزة التى تعمل عند درجة حرارة منخفضة، حافزًا لتطبيقـــات أخـــرى، مثـــل مكبرات الصوت ذات درجة الحرارة المنخفضة. إن الـــ SQUID، وهى أجهـــزة ثورية، تمثل أكثر أجهزة قياس الأقطاب الممغنطة، الموجودة حاليًا، حساسية، فهى قادرة على قياس فروق جهد بحدود واحد على مليون مليون من الفولت!

إن الدوائر الإلكترونية تصل إلى أحجام تقدر بواحد على مليار مـــن المتـــر وبالتالى تكون حساسة بشكل خاص للاضـــطرابات الحراريـــة. وتمثـــل الأجـــسام المتناهية الصغر، التى تجرى دراستها فى المعامل حاليًا عند حدود الصفر المطلق، مصدرًا للعديد من الاكتشافات الأساسية التى تنبنى عليها تكنولوجيا الغد.

المراجع

Livres
- Mendelssohn (K.), *La Recherche du Zéro Absolu*, Hachette, 1966.
- Conte (R. R.), *Éléments de Cryogénie*, Masson, 1970.
- Pobell (F.), *Matter and Methods at Low Temperatures*, Springer, 1996.
- Tilley (D. R.) et Tilley (J.), *Superfluidity and Superconductivity*, Institute of Physics Publishing, IOP London, 1996.
- Godfrin (H.), *La Science au présent* (recueil), Éd. Encyclopaedia Universalis, « Vers le Zéro Absolu ».

Articles de revues
- Balibar (S.), « L'Hélium, un liquide exemplaire », *La Recherche 256*, juillet-août 1993.
- Pobell (F.), « La quête du Zéro Absolu », *La Recherche 200*, juin 1988.
- Lounasmaa (O.), « Towards the Absolute Zero », *Physics Today*, déc. 1979, p. 32.
- Balibar (S.), « Aux frontières du Zéro Absolu », *La Recherche 157*, juillet-Août 1984.
- Bäuerle (C.), Bunkov (Y.), Fisher (S. N.), Godfrin (H.) et Pickett (G. R.), « L'Univers dans une éprouvette », *La Recherche 291*, 1996.

استخدام الأشعة السينية
(إشعاع السنكروترون لتحليل المادة)[٨١]

بقلم: إيف بتروف

Yves PETROFF

ترجمة: لبنى الريدى

مقدمة

لقد قام وليام كونراد رونتجن (Wilhelm Conrad Röntgen) باكتشاف الأشعة السينية فى نهاية القرن التاسع عشر، وحصل لأول مرة على صورة ليد بواسطة الأشعة السينية. وخلال أسابيع قليلة، تكررت التجربة فى مئات المعامل على امتداد العالم. كان من السهل بناء أنابيب لتوليد الأشعة السينية ولم تكن مكلفة: وتم إنشاء المئات منها، بما فى ذلك فى الأسواق ولدى بائعى الأحذية. وكان يتعين الانتظار عدة سنوات قبل إدراك أن للأشعة السينية بعض التأثيرات الضارة. لقد ظلت تطبيقات الأشعة السينية، لبعض الوقت، محصورة أساسًا فى المجال الطبى، سواء كان ذلك فى مجال التصوير أو العلاج. أما فيما يتعلق بأصل الأشعة السينية، فلقد ظل محل جدل شديد، طوال تلك الفترة.

فى عام ١٩١٢، توقع ماكس فون لوى (Max von Laue) أن يحدث انكسار للأشعة السينية بواسطة البلّورات. وبفضل هذه الطريقة، أصبح من الممكن الحصول على موقع الذرات فى المواد الصلبة، وبالتالى إمكانية وصف هذه المواد. وكان أول تركيب تم التعرف عليه هو تركيب كلوريد الصوديوم بواسطة سير وليام هنرى براج (William Henry Bragg) وابنه.

---

(٨١) نص المحاضرة رقم ٢٢٩ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٦ أغسطس ٢٠٠٠.

شهدت نهاية الأربعينيات من القرن العشرين ثلاثة أحداث مهمة:

- لقد رصد لأول مرة إشعاع صادر من إلكترونات نسبوية (سرعتها قريبة من سرعة الضوء) تم مسارعتها بواسطة مجالات مغناطيسية في آلات (سنكروترون)[٨٢] بنيت لدراسة فيزياء الجسيمات الأولية. وسمي هذا الإشعاع إشعاع سنكروترون (synchrotron).

- وفي الفترة نفسها تقريبًا، بدأ رصد الأشعة السينية القادمة من الفضاء، وذلك بفضل تجارب أجريت على متن صواريخ أعلى من الغلاف الجوى للأرض.إن المعلومة القادمة من الكون واردة من موجات كهرومغناطيسية تبعثها الأجسام السماوية أو تعكسها أو تنشرها. للأسف،الغلاف الجوى السائد حول الأرض يوقف الجزء الأكبر من هذه الأشعة باستثناء الجزء المرئى من الطيف (٠,٧ - ٠,٤ μm)، والأشعة تحت الحمراء وكذلك الموجات اللاسلكية (من بضعة مليمترات إلى ١٥ مترًا). إن الفيزياء الفلكية الخاصة بالأشعة السينية هي إذن علم حديث، وكان عليها انتظار توفر الصواريخ والأقمار لكي تتطور. ففي الواقع، رصد الأشعة السينية لا يمكن أن يتم إلا على ارتفاع ١٠٠ كم فوق سطح الأرض. وأجرى أول قياس عام ١٩٤٩، بواسطة مجموعة هـ. فردمان (H.Friedman)، من معمل الأبحاث البحرية بواشنطن، على متن صاروخ V2 تم استرجاعه في نهاية الحرب العالمية الثانية. لقد اتضح أن الانبعاث الذى رصده فردمان (Friedman) ضعيف جدًا وهو ما أحبط العديد من العلماء. لكن ر.جياكوني (R. Giaconni) قرر مواصلة هذا الطريق، وبعد محاولتين يائستين، حصل على نتائج باهرة فتحت العصر الحديث للفيزياء الفلكية الخاصة بالأشعة السينية. وفي السنوات التى تلت ذلك، تم اكتشاف العديد من مصادر الأشعة السينية القوية: Taurus X – 1 في سديم السرطان، و Cygnus X – 1 وكذلك المصادر الأولى من خارج المجرة (M87, Centarus A , 3C273). منذ أول قمر لدراسة الأشعة

(٨٢) مسارع جسيمات في مدار دائرى متزامن مع المجال المغناطيسي. (المترجمة)

السينية (Uhuru، الذى أطلق عام ١٩٧٠)، وهناك مهمة جديدة كل ثلاث أو أربع سنوات. وكان الحصاد خلال تلك السنوات غنيًا جدًا بما أن القمر Rosat سجل أكثر من ١٢٠ ألف مصدر إشعاع للأشعة السينية! لقد أوجدت هذه النتائج زخمًا من الأعمال النظرية. إن مصادر الأشعة السينية فى الكون يمكن أن يكون لها أصول متعددة. قد يتعلق الأمر بمصادر حرارية (غاز أو مواد يتم تسخينها لدرجات حرارة مرتفعة). من المعروف أن أى جسم يتم تسخينه تنبعث منه موجات كهرومغناطيسية. إن الشمس، التى تبلغ درجة الحرارة عند سطحها ما بين ٥ آلاف و٦ آلاف كلفن، ترسل موجات فى الطيف المرئى، لكن إكليل الشمس (من $١٠^٦$ كلفن إلى $١٠^٧$ كلفن) هو أيضًا مصدر قوى للأشعة السينية. وقد يكون ذلك إشعاع سنكروترون أيضًا، أو انتقالات ذرية للعناصر.

– أخيرًا، بدأنا بفضل الأشعة السينية تحديد التركيبات الأولى للبروتينات، وهى نظم بيولوجية معقدة تتكون من عدة عشرات الآلاف من الذرات.

إشعاع سنكروترون

يطلق اسم إشعاع سنكروترون على إشعاع الموجات الكهرومغناطيسية (أى أشعة سينية) المنبعث من الجسيمات المشحونة المتسارعة عند سرعات قريبة من سرعة الضوء. لقد تم حساب خواص هذا الإشعاع لأول مرة عام ١٩٤٤ فى الاتحاد السوفيتى، وبشكل مستقل فى الولايات المتحدة عام ١٩٤٥. ورصد لأول مرة فى الطيف المرئى على آلة صغيرة ذات ٧٠ Mev فى معمل جنرال الكتريك عام ١٩٤٧.

عندما يتعرض جسيم مشحون (إلكترون، أو بوزيترون،أو بروتون) إلى تسارع أوتقاصر، فإنه تنبعث منه موجات كهرومغناطيسية. وتوجد هذه الآلية فى الكون (سديم السرطان، أحزمة المشترى) أو على الأرض فى المسرعات الدائرية (تسمى غالبًا حلقات تخزين) التى شيدت لدراسة فيزياء الجسيمات.

كان محيط الآلات الأولى حوالى بضعة أمتار، وكانت طاقتها لا تتجاوز بضعة ملايين إلكترون فولت (Mev). أما جهاز التصادم الحالى التابع للمجلس الأوروبى للبحث النووى (CERN) الـLEP، فيبلغ محيطه ٢٧ كم وتبلغ طاقة الإلكترونات والبوزيترونات حوالى ٥٠ مليار إلكترون فولت (Gev).

فى مثل هذه الآلات، ينتج إشعاع سنكروترون عندما يتم تعريض الإلكترونات للتسارع بواسطة مغناطيسات ثنائية القطب، تسمح للإلكترونات بأن يكون لها مسار دائرى. وتتوقف طاقة الإلكترونات على النطاق الطيفى الذى يراد الحصول عليه: للعمل فى نطاق الموجات فوق البنفسجية والأشعة السينية اللينة (١٠٠ إلكترون فولت – ٣٠٠ إلكترون فولت) تكون طاقة الإلكترونات التى تتراوح ما بين ٨٠٠ ميجا فولت و١,٥ جيجا فولت كافية. وإذا كنا نحتاج إلى أشعة سينية قاسية (١٠-١٥٠ كيلو إلكترون فولت)، فإن طاقة الإلكترونات يجب أن تبلغ ٦ جيجا إلكترون فولت. ومن البديهى أن يتوقف حجم الحلقة على طاقة الإلكترونات: إن محيط آلة طاقتها ما بين ١ و٢ جيجا إلكترون فولت سيتراوح بين ١٠٠ و٢٥٠ مترًا، بينما يتراوح محيط آلة طاقتها من ٦ إلى ٨ جيجا إلكترون فولت ما بين ٨٥٠ مترا و١٤٠٠ متر.

إن إشعاع السنكروترون، الذى اكتشف عام ١٩٤٧، استغرق أكثر من عشرين عامًا قبل أن يتم استغلاله حقيقة كمصدر للأشعة السينية فى الاتحاد السوفيتى واليابان والولايات المتحدة وإيطاليا وفرنسا وألمانيا وبريطانيا. فعلى نقيض ما يمكن أن يعتقده البعض، الجماعة العلمية محافظة جدًّا!

إن آلات الجيل الأول أعدت لدراسة فيزياء الجسيمات، وجهز فيها بشكل متطفل بعض التجارب لاستخلاص الأشعة السينية والأشعة فوق البنفسجية.

بعد ذلك، أى فى سنوات الثمانينيات من القرن العشرين، تم بناء آلات الجيل الثانى خصيصًا لاستغلال إشعاع السنكروترون فقط. وبالتالى تم إدراك أنه يمكن كسب عوامل تقدر بألف أو عشرة آلاف من حيث شدة الأشعة السينية بوضع

تركيبات مغناطيسية تسمى عناصر إدماج (insertion) (أو مموجات onduleurs)، وهى تتكون غالبًا من مغناطيسات دائمة طولها عامة من ٣ إلى ٤ أمتار.

يعتمد الجيل الثالث من مصادر إشعاع السنكروترون أساسًا على عناصر الإدماج تلك.

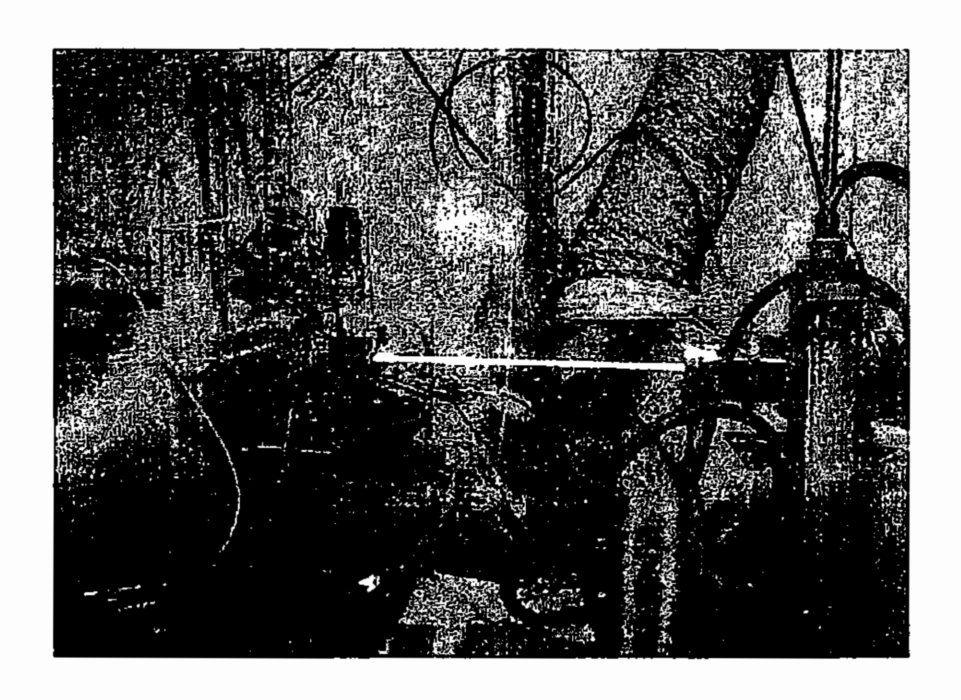
إن الإشعاع المنبعث من هذه الآلات متعدد الألوان وهو يمتد من موجات مليمترية إلى أشعة سينية قاسية. ومع عناصر إدماج، ينبعث الإشعاع فى مخروط ضيق جدًّا، قريب من مخروط الليزر. وفى آلة طاقتها ٦ جيجا إلكترون فولت، يكون انحراف الأشعة السينية ضعيف جدًّا (بحدود ٠,١ ملى زاوية نصف قطرية) مثل انحراف أشعة الليزر (الشكل رقم ١). ويكون الإشعاع فى شكل نبضات، بما أن الإلكترونات متجمعة فى حزم طولها بضعة سنتيمترات، وهو ما يعطى"نفخات" منتظمة يتراوح زمنها بين ٥٠ إلى ٢٠٠ بيكو ثانية،[٨٣] تبعًا للآلة.

إن العامل الأساسى الذى يميز النوعية البصرية للمصدر هو التألق. قد يكون التألق أعلى عشرة مليارات مرة من تألق أنبوب الأشعة السينية. ومنذ بداية القرن العشرين، تطور تألق مصادر الأشعة السينية تطورًا كبيرًا (الشكل رقم ٢). لقد ظل مستوى التألق ثابتا طوال خمسين عامًا. لكن إشعاع السنكروترون أكسب التألق عامل $١٠^{١٠}$ (١٠ مليار)، خلال ثلاثين عامًا. وهى ظاهرة نادرة تمامًا، والمثال المكافئ الوحيد هو مثال الليزر فى النطاق المرئى.

ونظرًا لخواصه الاستثنائية، وإمكانية تنفيذ حوالى خمسين تجربة حول حلقة تخزين واحدة، سرعان ما أصبح إشعاع السنكروترون، الذى كان يعتبر فى أول الأمر ضررًا، أداة لا غنى عنها للكيمياء والبيولوجيا وفيزياء الجوامد وفيزياء الأسطح والفيزياء الذرية والجزيئية، وهو حاليًا المصدر الأكثر قوة للأشعة السينية.

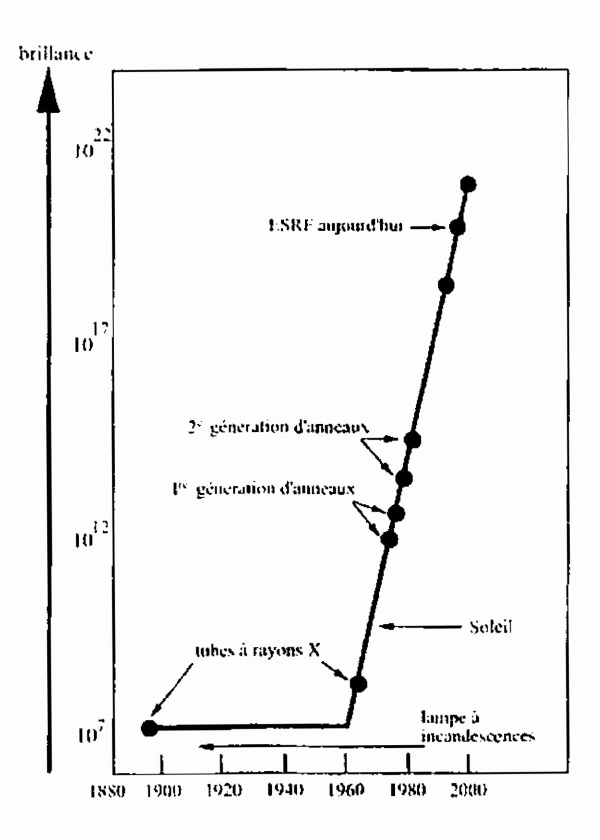
---

(٨٣) جزء من مليون المليون من الثانية. (المترجم)



الشكل (١)

حزمة أشعة سينية منبعثة من عنصر إدماج للـ ESRF (Grenoble). لقد أصبحت هذه الحزمة مرئية نظرًا لأن شـدتها القويـة (٣ كيلـو إلكترون فولت) أينت جزيئات الهواء. يمكن ملاحظة الانحراف الضعيف.



الشكل (٢)

تألق مصادر الأشعة السينية، مقارنة بتألق مصباح كهربى وتألق الشمس (من ١٨٩٥ إلى ٢٠٠٠). إن التألق هو الذى يميز النوعية البصرية للمصدر. لقد أحرز التألق تقدمًا كبيرًا منذ بداية القرن العشرين، بفضل إشعاع السنكروترون بشكل خاص.

يوجد حاليًا حوالى خمسين مركزًا فى العالم ينتجون إشعاع سنكروترون.

بعض أمثلة للإمكانيات الجديدة
التى يمنحها إشعاع السنكروترون

التصوير بالأشعة السينية

عندما نفحص صورة أشعة للجسم البشرى، نلاحظ على الفور إنـــه يمكننـــا تمييز العظام بشكل تام لكن ليس الأنسجة اللينة. والسبب فى ذلك، إننـــا إذا جنبنـــا العظام، فإن الماء يمثل ٦٥٪ من الجسم البشرى. ولا يمتص الماء المتكـــون مـــن عناصر خفيفة، الهيدروجين والأكسجين، إلا القليل من الأشعة السينية. فى الجانـــب المقابل، تمتص العظام التى تتكون أساسًا من الكالسيوم الأشعة بقوة.

إذن يتم الحصول على صور الأشعة السينية نتيجـــة تبـــاين الامتـــصاص. وبالتالى إذا كنا نريد إظهار الأنسجة اللينة، يتعين حقنها بعنصر أثقل: على ســـبيل المثال، إذا كنا نريد مشاهدة الشرايين التاجية، يحقن يود فـــى الـــدم. هـــل توجـــد إمكانيات لرؤية الأنسجة اللينة، أى بشكل عام الأجسام التى تمـــتص القليـــل مـــن الأشعة السينية؟ الإجابة نعم، لكن بتقنيات أخرى تحققت فى الطيف المرئـــى مـــع الليزر، وهى تقنيات قريبة جدًا من تصوير نتوءات الأشـــياء بأشـــعة الليـــزر. إن مشكلة توسيع هذه التقنيات لتشمل الأشعة السينية تكمن فى حقيقـــة إنهـــا تتطلـــب إشعاعًا متماسكًا مثل الإشعاع المنبعث بواسطة الليزر: فى الواقع، يمتلـــك الـــضوء المنبعث بواسطة الليزر تماسكًا فراغيًا، أى أنه لا ينحرف إلا قليلاً جدًا، كما يمتلك تماسكًا زمنيًا، أى أنه أحادى الطول الموجى. ولا يوجد حاليًا ليـــزر فـــى نطـــاق الأشعة السينية.

لقد رأينا أن انحراف الـــضوء (التماســـك الفراغـــى cohérence spatiale) المنبعث من عنصر إدماج يكون بحدود ١٠ $^{-٤}$ زاوية نصف قطرية، وهو انحـــراف قريب جدًا من انحراف ليزر صغير. ويمكن بسهولة الحصول على شعاع أحـــادى الطول الموجى بوضع موحد للطول الموجى على مسار الحزمة الضوئية. وبالتالى

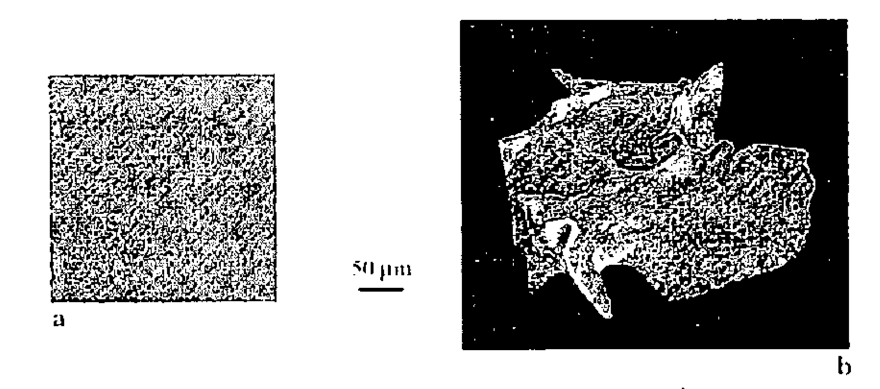
نحصل اصطناعيًا على ضوء متماسك فى نطاق الأشعة السينية. من الممكن، بالطبع، القيام بالشيء نفسه مع أنبوب أشعة سينية وجهاز توحيد الطول الموجى، لكن عدد الفوتونات التى ستنبعث سيكون ضعيفًا جدًّا ويصعب استغلاله.

هذه الإمكانيات الجديدة تفتح الطريق نحو العديد من التطبيقات فى مجال التعدين والطب. إن المثال الذى سنصفه تم الحصول عليه مؤخرًا فى الـ ESRF (جرينوبل Grenoble)، بواسطة ب.كلوتينس وآخرين (P.Cloetens et al).

حتى وقت قريب جدًّا، كان يتم الحصول على صور الأشعة السينية بتباين الامتصاص. فى الحقيقة، إذا كانت لدينا فرصة الحصول على أشعة سينية متماسكة، يمكننا إنتاج صور بتباين الطور. إن ذلك مثير للاهتمام خاصة عندما يتعلق الأمر بمواد مركبة من عناصر خفيفة (هيدروجين، أكسجين، كربون) تمتص القليل جدًّا من الأشعة السينية. لقد صورنا فى الشكل رقم (٣) مادة البولى إستيرين الإسفنجى فى صورتين فى ظل ظروف مختلفة:

- صورة تم الحصول عليها عند ١٨ كيلو إلكترون فولت (Kev)، بوضع المكشاف على مسافة ١٠ سم من الجسم. لا يتم استغلال التماسك ولدينا صورة عادية من حيث الامتصاص ومن ثم لا نستطيع رؤية شيئًا بما أن الامتصاص ضعيف جدًّا.

- سيتم الحصول على صور بتغيير مكان المكشاف لمسافات متغيرة ما بين ١٠ سم و ١٠٠ سم من الجسم. إن التداخل بين الحزم المباشرة والحزم التى انكسرت بواسطة الجسم، يسمح بإعادة بناء صورة ثلاثية الأبعاد مع حدة تمييز بحدود ١ μ متر. لقد تم الحصول على هذه الصورة المجسمة ابتداء من ٧٠٠ صورة ويمكن تنفيذ ذلك فى ساعة. إن استغلال التماسك هو الثورة الحقيقية فى التصوير بالأشعة السينية.



الشكل (٣)

صورة لمادة البولى إستيرين الإسفنجى تم الحصول عليها عند ١٨ كيلو إلكترون فولت.

(ا) فى حالة الامتصاص التقليدى: المادة ليست مرئية بما أنها لا تمتص الأشعة السينية.

(ب) الصورة التى تم إعادة تشكيلها باستغلال تماسك الضوء. يحد المكشاف حدة التمييز (١ µ متر). إن الاختلاف حاد.

تجارب الأشعة السينية تحت ضغط عالى

تسمح الأشعة السينية أيضًا باختبار النماذج الخاصة بداخل الأرض. بفضل مساعدة هذه الأشعة، يمكن الكشف عن تركيب المواد عند ضغط عالٍ جدًّا. نعنى بضغوط عالية جدًا، ضغوط أعلى من ١٠٠ جيجا باسكال (تقريبًا مليون جوى). هذه هى الضغوط السائدة داخل الأرض، وأيضًا فى الكواكب مثل المشترى. إن إنتاج هذه الضغوط فى المعمل مهم إذن لعلم طبيعة الأرض (الجيوفيزياء) والفيزياء الفلكية وعلم المواد.

فى الواقع، تغير زيادة الضغط بشكل كبير التفاعل بين الـذرات، وبالتـالى الخواص الكيميائية والفيزيائية. كما تسمح زيادة الضغط بالتحقق من صحة النماذج النظرية للمادة المكثفة (أى التى تم تصغير حجمها بالضغط).

كيف يتم الحصول على ضغوط بهذا الارتفاع؟ بطريقة بسيطة نسبيًا: بما أن اضغط هو قوة مطبقة على مساحة، فلزيادة الضغط، إما أن نزيـد القـوة أو نقلـل المساحة. بشكل عام، يتم استغلال الإمكانية الثانية. توضع العينة المطلوب دراستها فى حفرة مجهزة فى وصلة فلزية، وتضغط بين رأسى ماسـتين. يتعلـق الأمـر بماسات صغيرة ما بـين ٠,١ قيـراط و٠,٤ قيـراط (القيـراط = ٠,٢ جـرام). وللحصول على ضغوط بحدود ٣٠٠ جيجا باسكال، يجب ألا يتجاوز قطر العينـة ٢٠ μ متر، وهو ما يعنى أن حزمة الأشعة السينية يجب ألا تتجـاوز ١٠ μ متـر لفحص العينة. لقد صنعت الخلايا من الماس نظرًا لصلابة هذه المـادة ولـشفافيتها أيضًا للأشعة السينية. ولو احتاج الأمر تسخين المادة، فإن ذلك يتم بتركيـز أشـعة ليزر تحت حمراء فى مركز الخلية أو بالتسخين الحرارى.

عند الضغط المنخفض، يتبلّر الهيدروجين فى بنية متماسكة مسدسة الزوايـا والأضلاع وهو ما يعطى مادة صلبة جزيئية عازلة، بما أن جزيئات الهيـدروجين متوجهة عشوائيًا. تتوقع النظرية منذ وقت طويل أن يظهر الهيدروجين تحت ضغط عالٍ، ما بين١٠٠ و٣٠٠ جيجا باسكال، طورًا فلزيًا ذريًا حيث تتوقف الجزيئـات عن الوجود. وسيكون لهذا الهيدروجين الفلزى خواص غير عادية: بشكل خـاص، سيكون فائق التوصيل (أى مقاومته النوعية صفر) عند درجة حرارة الغرفة.

من المهم إذن معرفة إذا كانت هناك تغيرات فى التركيب البلّورى، ودراسة التغير فى الحجم تبعًا للضغط. إن هذه التجارب صعبة جدًا لأسباب عديـدة. مـن ناحية، تتغير شدة الانكسار فى تجربة للأشعة السينية تبعًا لمربع عدد الإلكترونات، ولا يملك الهيدروجين سوى إلكترون واحد، وبالتالى كان من المستحيل حتى فتـرة قريبة مشاهدة خطوط الانكسار الخاصة بالهيدروجين. ومن ناحية أخـرى، ينتـشر

الهيدروجين فى أغلب المواد. وأخيرًا، تتفتت بلّورات الهيدروجين الأحادية، عند تجاوز الضغط ٣٥ جيجا باسكال، مما يقلل شدة الإشارة بعدة مقادير.

مؤخرًا، نجح فريق فرنسي- أمريكى فى إجراء قياسات لضغوط تصل إلى ١٢٠ جيجا باسكال بفضل حيلة تتيح تفادى التفتت. لتحقيق ذلك، تم إثبات بلّورة هيدروجين فى مركز بلّورة هليوم. وعند الضغط العالى لا يكون الهيدروجين والهليوم قابلين للامتزاج، ويقوم الهليوم بدور وسادة هيدروستاتيكية. وسمح ذلك بقياس تغير الحجم تبعًا للضغط: إن النتيجة الجديرة بالذكر هى أنه لم يتم رصد الطور الفلزى الذى توقعته النظرية.

حاليًا، يعتقد أن ٨٨ ٪ من كوكب المشترى يتكون من هيدروجين فلزى. تتكون طبقة أولى تمتد ١٧٥٠٠ كم من هيدروجين جزيئى عازل، ويتكون الباقى من هيدروجين فلزى، باستثناء النواة المركزية الصغيرة. وللأسف، إن المجال المغناطيسي للمشترى الذى تم حسابه انطلاقًا من هذا النموذج، أضعف بكثير من المجال المغناطيسى الذى تم قياسه بواسطة مسبار أرسل هناك منذ بضعة سنوات. إن المجال المغناطيسى للمشترى هو الأقوى بين كل الكواكب وهو يدفع ريح الجسيمات المشحونة القادمة من الشمس إلى مسافة تبلغ مائة مرة نصف قطره (مقابل عشرة بالنسبة لكوكب الأرض).

لقد تكونت الأرض منذ حوالى ٤,٥ مليار عام، عندما قامت الأجسام التى تدور حول الشمس عند تكونها بالدخول فى تصادم ثم اندمجت. وتدريجيًا، أجبرت قوة الجاذبية العناصر الأثقل إلى الهجرة نحو مركز الأرض. وتتكون الأرض ابتداء من سطحها وحتى قلبها من طبقات متحدة المركز وذات خواص كيميائية مختلفة جدًّا. تتكون الطبقة الخارجية من القشرة الأرضية من صفائح تتزحزح الواحدة بالنسبة للأخرى بمعدل عدة سنتيمترات سنويًا. وتغطى صفائح المحيطات قشرة سمكها ٧ كيلومترات. إن هذه الصفائح باردة وأكثر كثافة من الطبقة السفلى (الدثار وهى جزء من الكرة الأرضية بين السطح والنواة المركزية المنصهرة)،

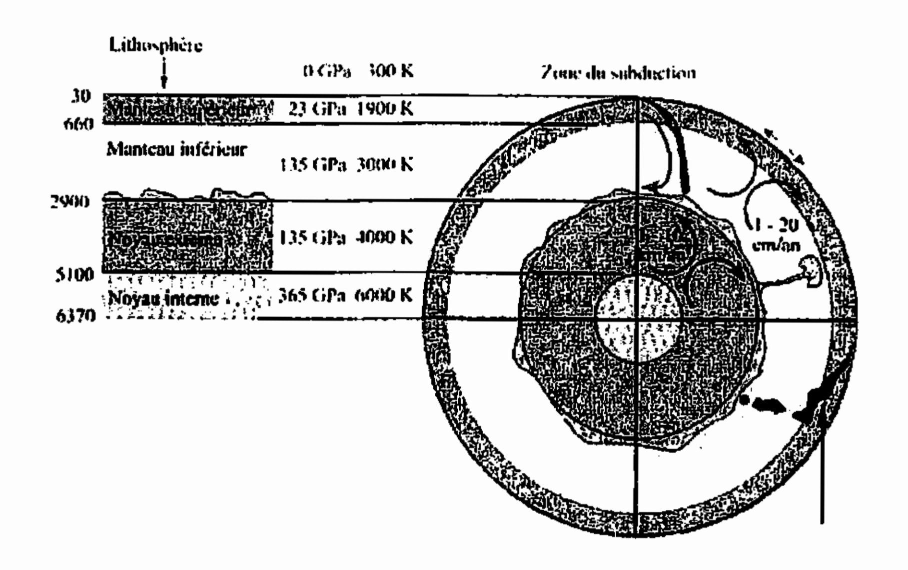
وهى تميل إلى أن تغوص فى هذه الطبقة فى أماكن تسمى مناطق السحب التحتى (subduction). إن الصفائح القارية، الأكثر سمكًا، لا تتعرض لهذه الظاهرة. وعلى حدود الصفائح، توجد المناطق البركانية ومناطق الزلازل. ويقع الدثار العلوى بين القشرة الخارجية والدثار السفلى. ويقدر سمكه بحوالى ٦٠٠ كم. وتبلغ الحرارة على عمق ٦٦٠ كم من سطح الأرض حوالى ١٩٠٠ كلفن ويصل الضغط إلى ٢٣ جيجا باسكال. ويمتد الدثار السفلى بين ٦٦٠ و٢٩٠٠ كم، وهو يتكون أساسًا من أكاسيد الحديد والماغنسيوم وكذلك من السليكات. وتصل درجة الحرارة عند ٢٩٠٠ كم إلى ٣٠٠٠ كلفن، ويصل الضغط إلى ١٣٥ جيجا باسكال (الشكل رقم ٤). ويقع القلب الخارجى للأرض ما بين ٢٩٠٠ كم و٥١٠٠ كم، ويتكون من سبيكة حديد – نيكل سائلة مع ١٠٪ من الشوائب (هيدروجين، كبريت، كربون، أكسجين، سيليسيوم...). إن هذه السبيكة السائلة هى مائع ينتقل بسرعة واحد كيلومتر/سنويًا، وهو عرضة لتيارات كهربائية: وهو مسئول عن المجال المغناطيسى الأرضى، نتيجة ظاهرة الدينامو. وبدراسة الصخور المغناطيسية التى يمكن قياس عمرها بدقة، اكتشفنا أن اتجاه المجال المغناطيسى الأرضى تغير عدة مرات منذ خلق الأرض (مع فترة تصل إلى عدة ملايين من السنوات). ويلعب السطح الفاصل بين القلب السائل والدثار السفلى الصلب، دورًا مهمًا جدًّا بسبب حالات عدم استمرار الخواص الكيميائية والفيزيائية فى هذا المكان. وعلى عمق ما بين ٥١٠٠ كم ٦٤٠٠ كم يوجد القلب المتكون من الحديد الصلب. وفى مركز الأرض –٦٤٠٠ كم، يصل الضغط إلى ٣٦٠ جيجا باسكال، وتقارب درجة الحرارة ٦٠٠٠ كلفن.

من أين ترد المعلومات عن هذا التركيب وهذه المعالم (بارامترات)؟ إنها ترد أساسًا من تقنية واحدة: دراسة الموجات الزلزالية. فالموجات المرنة الناجمة عن الهزات الأرضية تعبر كوكب الأرض بسرعات تختلف تبعًا للكثافة، والضغط ومعامل مرونة المواد. وتحدث الهزات الأرضية موجات طولية (تضاغط) وموجات مستعرضة (قص). والموجات الأخيرة لا تنتشر فى الجوامد. إن الأجهزة

الكاشفة الموضوعة حول الكرة الأرضية تسمح بقيـاس الموجـات المنعكـسة أو المنتشرة والحصول على النموذج الحالى.

فيم يمكن أن تفيد الأشعة السينية؟ فى اختبار هذا النموذج: ولتحقيـق ذلـك، نعيد فى المعمل بناء ظروف الضغط ودرجة الحرارة السائدة فى الطبقات المختلفة للأرض وعلى المواد نفسها. وبواسطة الأشعة السينية، يمكن دراسة تركيب المواد وتغيرات الطور.

غير أننا لا نستطيع حاليًا أن نكرر فى المعمل الظروف التـى تـسود فـى مركز الأرض (٦٤٠٠ كلفن و٣٦٠ جيجا باسكال). فى المقابـل، أمكـن مـؤخرًا ولأول مرة بلوغ ٣٠٤ جيجا باسكال و١٣٠٠ كلفن على عينة من الحديد، ودراسة التركيب السداسى وهو الشكل الذى يتم رصده فى هذه الظروف. إن ذلـك يطـابق ظروفًا قريبة بما يكفى للسطح الفاصل بين الحديد السائل والحديد الصلب، ويـسمح باختبار نماذج لداخل الكرة الأرضية أكثر دقة.



الشكل (٤)

مقطع للأرض يظهر الطبقات المختلفة (القشرة الأرضية، الدثار الخارجى، الدثار الداخلى، نواة خارجية، نواة داخلية). كما تم توضيح الضغوط ودرجات الحرارة. تتكون النواة الداخلية أساسًا من حديد صلب بينما تكون النواة الخارجية فى حالة سائلة. ويتكون الدثاران أساسًا من السيليكات.

تحديد التكوينات البيولوجية

إن هدف البيولوجيا الجزيئية هو فهم العمليات البيولوجية انطلاقًا من الخواص الكيميائية والفيزيائية للجزيئات الضخمة. وسنرى أن ذلك يتطلب المعرفة بالتركيب الذرى ثلاثى الأبعاد لهذه الجزيئات الضخمة، وهو أمر لا يدعو للدهشة بما أن من المعروف أننا بتغيير بنية شبه موصل أو فلز (بجعل درجة الحرارة مثلاً أو الضغط يتغير)، نغير أيضًا خواصه الكيميائية والفيزيائية.

غير أنه يوجد اختلاف أساسى بين الجماد والحى: تحتوى الخليــة الأوليــة للسيليسيوم بضع ذرات، فى حين تضم خلية فيروس عدة ملايين! إن حيود الأشــعة السينية وحده هو الذى يسمح بتحديد تكوينات بمثل هذا التعقيد، لكن بشرط استخدام إشعاع سنكروترون.

وحيث إن كل خلية تحوى ملايين البروتينات، التى تتفاعل بطريقة معقــدة، أصبح فهم عمل الخلية الحية أحد التحديات الرئيسية للعلم الحديث.

إن مما يسهل تحديد بنية الجزيئــات البيولوجيــة الــضخمة (البروتينــات، الريباسات (ribosomes) والفيروسات...) كونها تتركب من سلسلة من مجموعات ثانوية ذات حجم صغير (بضع ذرات) وهى الأحماض الأمينية بالنسبة للبروتينــات والنيكلوتيدات (nucléotides)، مكونات الخلية الحية، بالنسبة للدنا (A D N).

لقد تم الحصول على أول صورة لحيود الأشعة السينية بالنسبة للبروتينات فى كمبريدج عام ١٩٣٤ بواسطة الفيزيائى الإنجليــزى ج. د. برنـــال (J.D.Bernal). وتطلب الأمر الانتظار لأكثر من عشرين عامًا قبل التمكن من تفسيرها والرجوع إلى البنية ذاتها لهذه البروتينات. إن اكتشاف فرانسيس كريك (Francis Crick) وجيمس واطسون (James Watson) لتركيب الحامض النووى "الدنا" عـــام ١٩٥٣ بواســطة هذه الطريقة – وأيضًا فى كمبريدج! – كان بمثابة نقطة انطلاق البيولوجيا الجزيئية.

الأحماض الأمينية والبروتينات

إن الأحماض الأمينية هى المكونات الأساسية للبروتينات: يــستخدم الكــائن الحى عشرين حمضًا أمينيًا فقط. ولدى جميع الأحماض الأمينية ذرة كربــون Cα ترتبط بها ذرة هيدروجين، ومجموعة أمينية NH_2 (N = نيتروجين)، ومجموعــة COOH، تسمى المجموعة الكربوكسيلية، وأخيرًا سلسلة جانبية تعتبر شقًا، وتسمى R، وهى مختلفة لكل حمض أمينى وتقوم الشفرة الوراثية بتخصيصها.

وتكون الأحماض الأمينية سلاسل بفضل روابط ببتيدية، يتطلب تكونها استبعاد جزيئات ماء: يحتوى الببتيد (peptide) بضعة أحماض أمينية، ويمكن لمتعدد الأمين أن يبلغ ١٥٠ حمضًا أمينيًا.

وتسمى السلاسل "تكوينات أولية للبروتينات". وفيما وراء التكوين الأولى، تكون السلاسل، بفضل روابط هيدروجين بين بعض الأحماض الأمينية، إما خطوط لولبية α أو وريقات β. لقد وصف لينوس باولنج (Linus Pauling) عام ١٩٥١، البنية اللولبية α، وأوضح أن هذه البنية لا بد أن تكون عنصرًا أساسيًا للبروتينات. ولقد تم التحقق من ذلك بعد بضع سنوات على يد ماكس فرديناند بيروتز (Max Ferdinand Perutz)، الذى اكتشف تركيب الهيموجلوبين، واكتشف جون كوودرى كندرو (John Cowdery Kendrew) عام ١٩٥٨ تركيب الكريين العضلى (myoglobine)، وهو ما استحقا عليه جائزة نوبل عام ١٩٦٢.

لكن هذا ليس كل شيء! إن البروتين سيغير أيضًا من شكله. تستطيع الوريقات β والخطوط اللولبية α أن تنطوى، تحت تأثير عدة معالم (بارامترات) يظل بعضها غير معروف، لتكون كتلاً كروية: إنها البنية الثلاثية. ويلعب الماء دورًا مهمًا فى هذا الانطواء: فى الواقع، تلتف السلاسل الجانبية الطاردة للماء نحو الداخل، خالقة قلبًا طاردًا للماء وسطحًا ماصًا للماء. ويمثل ذلك أحد مميزات البروتينات التى أظهرها كندرو (Kendrew)أثناء تحديد تركيب الكريين العضلى (myoglobine). وأخيرًا، يؤدى تجمع عدة سلاسل متعددة الأمين بروابط ضعيفة إلى بنية رباعية: تتكون هذه البنية إذن من تجميع من البنى الثلاثية.

إن بعض البروتينات لا تحتوى على خطوط لولبيةα: إنها حالة الجلوبين[٨٤] مثلاً. وهناك بروتينات أخرى تتكون فقط من الوريقات: الإنزيمات (وهى بروتينات تقوم بدور المواد الحافزة)، والأجسام المضادة أو البروتينات التى تحيط

(٨٤) بروتين مؤلف من عدة أمينات يدخل فى تركيب اليحمور أى الهيموجلوبين. (المترجم)

الفيروسات. إلا أن، العديد من البروتينات تحتوى على خطوط لولبية كمـا علـى وريقات.

إن الكريين العـضلى (myoglobine) واليحمـور (hémoglobine) لهمـا أهمية عظمى للجسم: إنهما يسمحان على التوالى بتخزين الأكسجين فى العـضلات ونقله فى الدم. إن بنية الجلوبين كانت أولى بنى للبروتينات المكتشفة بفضل الأشعة السينية.

مكونات الخلية الحية والأحماض النووية

يلعب حامضان نوويان دورًا أساسيًا: الـدنا (A D N) والرنـا (A R N). إن الدنا هو المكون الرئيسى للصبغيات ودعامة الوراثة، أما الرنـا فلـه العديـد مـن التنويعات، ويعرف بأنه المرسال بين الجينات ومواقع تخليق البروتينـات. وتتكـون الأحماض النووية ابتداء من بضع من مكونات الخلية الحية (nucléotides). وتتكون هذه الأخيرة من سكر وقاعدة ومجموعة فوسفات. ويكون السكر إما نبتوز (ribose) فى حالة الرنا، أو نبتوز منزوع الأكسجين (désoxyribose) بالنسبة للدنا.

وكما رأينا فى حالة البروتينات، يوجد أيضًا تركيبات أولية وثانوية وثلاثيـة بالنسب للنيكلوتيدات. إن التكوين الأولى هو سلـسلة مـن النيكلوتيـدات (متعـدد النيكلوتيد). والتكوين الثانوى هو لولـب واطـسون (Watson) وكريـك (Crick) المزدوج الشهير: إنه يتكون من سلسلتين من متعددى النيكلوتيد تلتفان حول محـور مشترك. وتتحد السلسلتان بواسطة روابط هيدروجين موجودة بين أزواج القواعـد. ولا يقترن الأدنين (A) إلا مع التيمين (T) بواسطة رابطتى هيدروجين، ويـرتبط الجانين (G) مع السيتوزين (C) بثلاث روابط هيدروجين.

إن التتابع الدقيق للقواعد فى الدنا هو الذى يحدد المعلومة الوراثية: فـالقطع المختلفة من هذا اللولب المزدوج تكون الجينات. ويتصرف الـدنا مثـل برنـامج معلوماتى يبين للخلية ما يجب عليها أن تفعله.

تحديد بنية الجزيئات الضخمة

لماذا نحتاج إلى معرفة بنية الجزيئات الضخمة؟ لأننا ببساطة نعلم حاليًا أنــه توجد علاقة بين الوظيفة البيولوجية للجزئ الضخم، والشكل الذى يتخذه فى حيــز ثلاثى الأبعاد: إن معرفة بنية فيروس تسمح بإنتاج العقاقير المضادة للفيروســات، ومعرفة بنية الريباسة مفيدة لخلق مضادات حيوية جديدة، تعمــل علـــى مهاجمــة الجهاز الوراثى للبكتريــا. وأخيــرًا، ستــسمح معرفـــة بنيـــة الجــسم النـــووى (nucléosome) بتحكم أفضل فى الجينات وفاعلية أكبر للهندسة الوراثية.

هناك طريقتان متاحتان لكى يكون هذا الرصد ممكنا. الطريقة الأولى هـــى الرنين المغناطيسى النووى (R M N) والتى لا نستطيع هنا الدخول فى تفاصـــيلها. وتنبع ميزة الرنين المغناطيسى النووى من حقيقة أنه يعطى نتائج فى الطور السائل (فى الجسم الحى): فهو لا يتطلب الحصول على بلّورات. لكنه لا يستطيع تحليــل سوى التركيبات ذات الوزن الجزيئى غير المرتفع (٣٠ ألف دالتون[٨٥]).

والطريقة الثانية هى حيود الأشعة السينية، وهى الأكثر اســتخدامًا بكثيــر. وتتراوح حدة التمييز التى يتم الحصول عليها بين ١,٥ أنجستروم و٣ أنجــستروم. إلا أنها تنطوى على عائق هو أنها تتطلب بلّورات أحادية. إن السؤال الأول الــذى يمكن أن يطرح، وكان موضوع الكثير من الجدل فـــى بدايـــة دراســـة بلّـــورات البروتينات، هو معرفة إذا كانت الجزيئات الضخمة تحافظ على وظائفها البيولوجية فى الطور البلّورى. إن الرد إيجابى بوضوح، وقد تم إثبات ذلك بالنسبة للأنزيمات بشكل خاص. وتنبع إحدى المصاعب من حقيقة أنه ليس من اليسير أبــدًا "إنبـــات" بلّورات أحادية كبيرة الحجم: بالإضافة إلى ذلك، يتعين، أثناء القياســـات، أن تظـــل ملامسة للمحلول الذى جعلها تنبت. فى بداية علـــم التبلّـــر الخـــاص بالجزيئـــات البيولوجية، كان اكتشاف بنية بروتين يتطلب عدة سنوات. حاليًـــا، تكفـــى بـــضع ساعات أو بضعة أيام بالنسبة للحالات الأبسط.

(٨٥) دالتون: وحدة كتلة تساوى ١/١٦ من كتلة ذرة الأكسجين.

لقد تم فى أول الأمر دراسة العديد من تركيبات البروتينات بواسطة أنابيب الأشعة السينية "لوضع الخطوط العريضة". لكن للحصول على تركيبات ذات حدة تمييز عالية، ولتحديد بنية مجموعات ذات أحجام كبيرة مثل الريباسة (ribosome) والفيروسات، يتعين بشكل إلزامى استخدام إشعاع سنكروترون.

علم التبلّر الخاص بالجزيئات البيولوجية

لقد رأينا كيف تتكون البروتينات والفيروسات. سنتناول الآن عدة أمثلة لتجارب كان لا يمكن إجراؤها منذ بضع سنوات: تدرس التجربة الأولى تعديلات لبنية بروتين ما بمقياس بضعة أجزاء من المليار من الثانية أثناء تفاعل بيولوجى. وتتناول التجربة الثانية اكتشاف بنية فيروس تحتوى خليته، التى تمثل الوحدة بالنسبة له، على عدة ملايين من الذرات. أما التجربتان الأخيرتان فتتعلقان بمجموعات كبيرة الحجم، الجسم النووى والريباسة (ribosome).

لماذا من المهم إنجاز تجارب تتم فى جزء من المليار من الثانية؟ لأن الجزيئات البيولوجية تحدث لها تغيرات بنيوية سريعة للغاية أثناء قيامها بوظيفتها البيولوجية.

من المعروف أن الكريين العضلى (myoglobine)، وهو بروتين موجود فى العضلات، يختزن الأكسجين لتحويله إلى طاقة. وكما رأينا سابقًا، يستقر الأكسجين على الحديد. وعندما حل كندرو (Kendrew) تركيب الميوجلوبين عام ١٩٦٠، تسأل على الفور عن كيف يستطيع جزئ الأكسجين أن يدخل ويخرج من الميوجلوبين، نظرًا لتكاثف تركيبه. وكان استنتاجه أن التركيب المذكور لا يمكن أن يكون ستاتيكيًا ساكنًا، بل هو ديناميكى متحرك، فهو "يتنفس" بفضل قنوات تفتح وتقفل للسماح بالوصول إلى حديد اليحمور (الهيموجلوبين). ما هذه القنوات؟ ما السرعة التى يرد بها البروتين على انفصال الأكسجين عن الحديد؟ لدينا حاليًا بداية إجابة.

لقد أجريت التجربة بواسطة بلّورة ميوجلوبين مع أول أكسيد الكربون (CO) الذى يقترن بسهولة أكبر من الأكسجين. فى اللحظة t=0، يتم إرسال نبضة قصيرة لليزر مرئى على البلّورة، لقد تم اختيار الطول الموجى لهذا الليزر لكسر الارتباط بين أول أكسيد الكربون والحديد. فى اللحظة t=0، يكون جزئ أول أكسيد الكربون مرتبط بذرة الحديد: وبعد أربعة أجزاء من المليار من الثانية، يكون جزئ أول أكسيد الكربون قد ابتعد مسافة ٤ أنجستروم وانقلب ٩٠ درجة (الشكل رقم ٥ خارج النص). ويظل فى هذه الهيئة لمدة ٣٥٠ نانوثانية.[٨٦] وبعد ميكروثانية، يكون جزئ أول أكسيد الكربون قد غادر حديد الهيموجلوبين. ويمكن فى آن واحد مراقبة تغير موضع اللوالب وموضع بعض الأحماض الأمينية.

إذن، لقد أمكن لأول مرة إنجاز فيلم لتغيرات تركيب بروتين أثناء قيامه بوظيفته البيولوجية. غير أن للتوصل إلى مراقبة الآليات الأساسية، يتعين كسب عدة درجات فى مقدار حدة التمييز الزمنية، وهو ليس بالأمر المستحيل.

بنية فيروسات كبيرة جدًا

لكل فيروس شكله الخاص به، لكن لكل الفيروسات نقاط مشتركة. يحتوى القلب حامضًا نوويًا (دنا أو رنا). ويحمى هذا القلب غلاف يتكون من بروتين أو أكثر (ظرف صغير فى المادة الحية)، وتكون هذه البروتينات عامة متماثلة. عند بعض الفيروسات، مثل فيروس الزكام، تحاط هذه المجموعة ذاتها بغلاف غنى بالبروتينات والليبيدات (الشحوم) والكربوهيدرات.

وفى عام ١٩٩٨، فى جرينوبل (Grenoble)، نجح فريق من أوكسفورد فى تحديد تركيب فيروس اللسان الأزرق الذى يصيب الأغنام ولا ينتقل إلى الإنسان. يتركب هذا الفيروس من غلاف خارجى متكون من ٢٦٠ بوليمر كتلته الجزيئية ثلاثة أضعاف كتلة المركب غير المتبلمر. وقطر النواة المركزية ٨٠٠ أنجستروم

(٨٦) نانوثانية: جزء من مليار من الثانية. (المترجم)

(انظر الشكل رقم ٦ خارج النص) ووزنه الجزيئـــى ١٠^٦ ×٦٠ دالتـــون! ويـــضم ٧٨٠ بروتينًا من نوع و١٢٠ بروتينًا من نوع آخر. وتوجد المعلومـــات الوراثيـــة داخله فى شكل عشرة جزيئات رنا تضم ١٩٢٠٠ زوج من القواعـــد. إنـــه أكبـــر تركيب لفيروس تم اكتشافه، لكن هذا الرقم القياسى لن يـــدوم طـــويلاً. وستـــسمح المعلومات البنيوية التى تم الحصول عليها بإنتاج عقار له.

البروتينات النووية

يتعلق الأمر بمجموعة ذات أبعاد كبيرة جدًا (عدة مئات من الأنجسترومات) تتكون من بروتينات وأحماض نووية وهى تلعب دورًا أساسيًا فى الجسم البشرى:

– "الجسم النـــووى" (nucléosome):هـــو البنيـــة الأوليـــة للـــصبغين[٨٧] (كروماتين)، وهو يتكون من مائتى زوج من قواعد الدنا ومـــن نـــسختين لأربـــع قصص مختلفة. لقد قام فريق ريشموند (Richmond) (زيورخ) بحل هـــذه البنيـــة عام ١٩٩٧.

– "الريباسة" (ribosome): إنه المكون الرئيـــسى لآليـــة ترجمـــة الـــشفرة الوراثية، أى تخليق البروتينات بمعنى "إنتاج" بروتينات الجسم البشرى.

فى عام ١٩٩٩ نجحت ثلاث فرق أمريكية فى الحصول على بنية ذات حدة تمييز ٥ أنجـــستروم (فـــى NSLS-Brookhaven وALS-Berkeley). كمـــا أن دراسات حديثة أجريت فى الـــ ESRF قد اقتربت من ٢,٥ – ٣ أنجستروم.

(٨٧) مادة بروتينية على شكل حبيبات تكون فى نواة الخلية ولها خاصية امتصاص المواد الملونة بـــشدة. (المترجم)

الخلاصة

لقد اخترت بطريقة كيفية مثالين أو ثلاثة لتوضيح الإمكانات الجديدة لإشعاع السنكروترون. وكان يمكننى أيضًا أن أبين التطور الكبير لدراسة المغناطيسية، والذى يرجع جزء كبير منه إلى اكتشاف المقاومة المغناطيسية العملاقة، أو دراسات السطح خاصة فى مجال التحفيز، أو التركيبات الإلكترونية الخاصة بالموصلات الفائقة عند درجة حرارة عالية.

لقد أصبح إشعاع السنكروترون حاليًا أداة لا غنى عنها لدراسة المواد. إلا أننا يجب ألا ننسى أن المشكلة الفيزيائية نادرًا ما يمكن حلها بتقنية واحدة. إذن هو تقنية بين تقنيات أخرى: عندما يتم دراسة سطح فإن الحيود السطحى الخاص بالأشعة السينية ومجهرية النفق يقدمان معلومات مكملة لبعضها.

المراجع

1. Cloetens (P.) *et al.*, *Applied Phys. Lett.*, n° 75, 1999, p. 2912.
2. Loubeyre (P.) *et al.*, *Nature*, n° 383, 1996, p. 702.
3. Gillet (P.) et Guyot (F.), *Phys. World*, n° 9, 1996, p. 27.
4. Dubrovinsky (L. S.) *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, n° 84, 2000, p. 1720.
5. Dziewonski (A. M.) et Anderson (D. L.), *Phys. Earth Planet. Inter.*, n° 25, 1981, p. 297.

6. Brändén (C. I.) et Toozl (J.), *Introduction to Protein Structure*, Garland Publ. Inc. New York — London 1991.
7. Srajer (V.) *et al.*, *Science*, n° 274, 1996, p. 1726.
8. Grimes (J. M.) *et al.*, *Nature*, n° 395, 1998, p. 470.
9. K. Luger *et al.*, *Nature*, n° 389, 1997, p. 251.
10. Clemons (W. M.) *et al.*, *Nature*, n° 400, 1999, p. 833.
11. Ban (N.) *et al.*, *Nature*, n° 400, 1999, p. 841.
12. Cate R. *et al.*, *Science*, n° 285, 1999, p. 2095.

- Baibich (M. N.) *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, n° 61, 1988, p. 2472.
- Petroff (Y.), *Les rayons X (de l'Astrophysique à la Nanophysique)*, Collection Dominos, Flammarion, 1998.

المواد المغناطيسية:
من البوصلة إلى إلكترونيات اللف الذاتى[٨٨]

بقلم: ميشيل بيكوش
Michel PIECUCH

ترجمة: لبنى الريدى

إن المواد المغناطيسية موجودة فى كل مكان فى بيئتنا، فأية سيارة يمكن مثلاً أن تحتوى على ٧٠ جهازًا مختلفًا يستخدم هذه المواد، مثل المحركات الكهربية، ومحركات أو ناقلات الحركة، وأجهزة الرصد... ومع ذلك يظل وجود هذه المواد المخفى داخل عدد لا يحصى من الأشياء التقنية غامضًا مثل الكلمة نفسها. سنحاول، فيما يلى، إيضاح طريقة عمل هذه المواد والمفاهيم العلمية التى تعتمد عليها.

نبذة تاريخية

يعود تاريخ المواد المغناطيسية إلى حقبة قديمة جدًا، معاصرة تقريبًا لاكتشاف الحديد. إن الإشارات الأولى التى كتبها اليونانيون عن وجود مغناطيسات ترجع إلى حوالى ٨٠٠ عام قبل ميلاد المسيح،[٨٩] كما ذكر العديد من الفلاسفة اسم "ممغنطات". إن أصل هذا الاسم محل جدل، وروايتى المفضلة هى رواية وليم جيلبرت (William Gilbert)، طبيب الملكة إليزابيث الأولى الذى يقول إنه أخذها من بلين (Pline)، حيث يفترض أن اسم مغنطيت قد جاء من اسم الراعى ماجنس (Magnés): "الذى كان يرعى قطيعه عندما التصقت مسامير نعله والطرف الحديدى لعصا الرعى الخاصة به بحجر مغناطيسى".

(٨٨) نص المحاضرة رقم ٢٣٠ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٧ أغسطس ٢٠٠٠.
(٨٩) يمكن العثور على مراجع تاريخية أكثر تفصيلاً فى كلمة "مغناطيسية"، المجلد الأول أسس. تحت إدارة Etienne du Tremolet de Lachaisserie, مطبوعات جرينوبل الجامعية ١٩٩٩.

وبالتوازى مع اليونانيين، اكتشف الصينيون أيضًا المغناطيس، لكنهم لاحظوا قدرة أحجار المغناطيس على التوجه فى المجال المغناطيسى للكرة الأرضية، وهو ما يمثل اكتشافًا حاسمًا. وهناك لوحة رسم ترجع إلى حوالى خمسين عامًا بعد الميلاد، تبين أداة تدل على الاتجاه تتكون من ملعقة موضوعة على صينية. أما البوصلة الصينية التقليدية فتتكون من سمكة مصنوعة من صفيحة رقيقة من الحديد، تسخن لدرجة الاحمرار ثم تغمر فى الماء البارد وتوضع فوق حوض ماء، وهى تشير إلى الشمال المغناطيسى (حوالى عام ألف).

وفى أوروبا، نشر بيير بليرين دو ماريكور (Pierre Pèlerin de Maricourt) عام ١٢٦٩، أول كتاب جاد عن موضوع المغناطيس (De Magnete). وكان أول من تكلم عن القطب المغناطيسى.

أما علم المغناطيسية الحديث فكان متأخرًا عن ذلك، ويرجع تاريخه إلى اكتشافات شارلز أوغسطين كولوم (Charles Augustin Coulomb). لقد وضع قانون تغير القوة المغناطيسية تبعًا للمسافة (١٧٨٥)، واستخدم لذلك ميزان إلتوائى.[٩٠]

وفى أبريل ١٨٢٠، أجرى عالم الفيزياء الدنماركى هانز كريستيان أورستيد (Hans Christian Oersted) تجربة مهمة جدًا. لقد أثبت أن سلكا يمر فيه تيار كهربى يولد مجالا مغناطيسيا: " تنحرف إبرة البوصلة الموضوعة على مقربة من هذا السلك عندما يمر فيه تيار كهربى". ويعد هذا الاكتشاف أساسًا لكل المحركات الكهربية: إن التفاعل بين مادة مغناطيسية وتيار كهربى يولد حركة.

وفى العام التالى (١٨٢١)، اكتشف ميشيل فاراداى (Michael Faraday) ظاهرة الحث: عند وضع مجال مغناطيسى متغير على مقربة من ملف، يتولد تيار كهربى فى هذا الملف. إنه اكتشاف للعملية التى تنتج الكهرباء فى مولدات التيار،

---

(٩٠) يستخدم لقياس مجالات القوى (المترجم).

ومولدات التيار المتناوب (المتردد). ومع اكتشافات أورستد وفاراداى بـدأ عـصر الثورة الصناعية الثانية، فقد توفرت وسائل إنتاج الكهربـاء وتـم معرفـة كيفيـة استخدامها لصنع محركات.

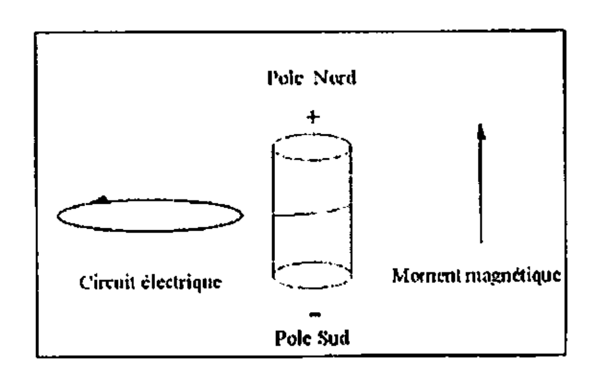
فيزياء المغناطيسية

مفاهيم أساسية:

إن المفهومين المركزيين فى فيزياء المغناطيـسية، همـا مفهـوم المجـال المغناطيسى ومفهوم العزم المغناطيسى.

إن المغناطيس الدائم هو أبسط جسم مغناطيسى. ويمارس هـذا المغنـاطيس قوة على مغناطيس آخر، أو على مواد مغناطيـسية مثـل الحديـد. ولـو راقبنـا مغناطيسين أثناء تفاعلهما، نجد أنهما يتجاذبان أو يتنافران، حيث هناك تأثير عـن بعد، إنه المجال المغناطيسى الناجم عن أحد المغناطيـسين والـذى يتفاعـل مـع المغناطيس الآخر. وإذا كان أحد المغناطيسين حرًا، فإنه يدور لو كان فى "الاتجـاه الخاطئ"، ويقال إن المغناطيس له قطبين. يتنافر القطبـان المتمـاثلان، ويتجـاذب القطبان المختلفان. ولتحديد مفهوم الأقطاب بدقة تم تعريف العزم المغناطيسى، وهو متجه يتجه من القطب الجنوبى إلى القطب الشمالى. إذن، يملك المغناطيس عزمًـا مغناطيسيًا، ويولد هذا العزم مجالاً مغناطيسيًا.

إن أبسط الدوائر الكهربية هى حلقة تيار، وهى تكافئ مغناطيسًا دائمًا (الشكل رقم ١). إن العزم المغناطيسى للحلقة هو متجه متعامد على مستوى الحلقة، وتحسب شدته بحاصل ضرب شدة التيار الكهربى المار فى الحلقة ومـساحة هـذه الحلقـة. ويعبر عن المجال المغناطيسى الناتج عن الحلقة بالصيغ نفـسها الخاصـة بالمجـال الكهربى الناتج عن ثنائى استقطاب كهربى (شحنتان لهما إشارات متضادة).



الشكل (١)

تعتبر حلقة التيار (الدائرة الكهربية) والمغناطيس مصادر متكافئة للمجال المغناطيسى، ويتم تمثيلهما بمتجه، هو العزم المغناطيسى.

إن القوة التى يمارسها مجال مغناطيسى علـــى عــزم مغناطيـــسى (تـــأثير مغناطيس على مغناطيس آخر، على سبيل المثال)، ترتكز على مبدأ بـــسيط جـــدًا: فهى تعتمد على البحث عن الحد الأدنى للطاقة. ويتم الحصول على طاقة التفاعـــل بين مجال مغناطيسى وعزم مغناطيسى بحاصل ضرب عددى (لا موجه) لمتجهين:

$$E = \vec{m} \cdot \vec{B} = - mB \cos\theta$$

حيث θ هى الزاوية بين المتجهـــين. إذن، ســـيرغب العـــزم المغناطيـــسى لمغناطيس ما، أن يصطف مع المجال المغناطيسى (لجعل الزاوية أصغر، أو جيب تمام الزاوية أكبر)، وسيدور، ويتجه المغناطيس بعد ذلك نحو المجـــال الأقـــصى، حيث إن المجال يزيد عند الاقتراب من مغناطيس ما، وهو ما يفسر التجاذب بـــين مغناطيسين.

تصف ميكانيكا الكم حركة الإلكترونات فى الذرات. يمكن، تقليـديًا، تخيـل إلكترون آخذ فى رسم مدار حول نواة الذرة. إن هذه الشحنة الكهربية التى تـدور تكافئ لفة تيار، ومن ثم تنتج مجالاً مغناطيسيًا، ويسمى العزم المغناطيسى المقابل، عزمًا مغناطيسيًا مداريًا. ومن ناحية أخرى، فإن للإلكترون عزم مغناطيسى آخـر، يمكن تخيله وكأنه مماثل لحركة دوران خاصة بالإلكترون ذاته (إن الإلكترون مثل الأرض يدور حول النواة (الشمس) وحول نفسه)، لكن لا يمكن فـى الواقـع فهـم حركة الدوران تلك إلا من خلال ميكانيكا الكم. ويتناسب هذا العزم المغناطيسى مع متجه يرسم حالة الدوران هذه التى تسمى "اللف الذاتى" (le spin). إن مثـل هـذا الوصف يميل إلى جعل المرء يعتقد أن كل الذرات تحمل عزمًا مغناطيسيًا (مجموع العزم المدارى وعزم اللف الذاتى لكل الإلكترونات الموجودة فى الذرة). غيـر أن مبدأ امتلاء الأوضاع الإلكترونية المختلفة للذرة، ومبدأ الاستبعاد الخـاص ببـاولى (Pauli) (تؤمن الإلكترونات بالفردية بشكل لا يمكن إصلاحه ولا يمكن أن يكـون هناك إلكترونان فى الوضع نفسه) والتركيب فى شكل طبقات متتاليـة، كـل ذلـك يجعل العزوم المغناطيسية تتعادل. ففي طبقة كاملة، مثلاً، لا يستطيع إلكترونان أن يكون لهما الوضع المدارى نفسه، إلا إذا كان اللف الذاتى لكل منهمـا مختلفـًا أى متضادًا (يدور أحد الإلكترونين فى اتجاه، ويدور الإلكترون الآخـر فـى الاتجـاه الآخر). ورغم كل شىء، يظل هناك عزم مغناطيسى ذرى بالنسبة للطبقات الذرية الناقصة، ومن ثم تحمل كل الذرات تقريبًا عزمًا، ووحدة العزم المغناطيسى للذرات هى مغنيطون بوهر (magnéton de Bohr)، الذى يتطابق مع عزم اللف الـذاتى لإلكترون مستقل.

عند تكوين الجزيئات، تعتمد الآليات التى تحكم الروابط الكيمائية على تكوين طبقات كاملة (لو أن عدد إلكترونات تكافؤ ذرة ما (إلكترونات طبقتها الناقصة) هو (ن) وعدد إلكترونات تكافؤ ذرة أخرى هو (م)، فإنهما تكونان رابطة كيمائيـة إذا

كان م + ن = ٨، أى إذا تطابق العدد الكلى لإلكترونات التكافؤ مع طبقـــة كاملـــة) ومن ثم لا تحمل الجزيئات عزومًا مغناطيسية. (فى الطبقة الكاملـــة يكـــون عـــدد الإلكترونات ذات اللف الذاتى فى اتجاه، مساويًا لعدد الإلكترونات التى تلف ذاتيًـــا فى الاتجاه الآخر، ويكون عدد الإلكترونات التى تدور حول النواة فى اتجـــاه مـــا، مساويًا لعدد الإلكترونات التى تدور حول النواة فى الاتجاه الآخر). غيـــر أن هـــذه المركبات تكتسب عزمًا تحت تأثير مجال مغناطيسى، ويميل هذا العزم إلى خلـــق رد فعل للمجال المستخدم: هو مضاد لـــه، وتتنـــافر إذن هـــذه المـــواد المـــسماة دايامغناطيسية (diamagnétiques)، أى ذات إنفانية مغناطيـسية ضـــعيفة، مـــع المجال.

عندما تمتلك الذرات طبقات لا تتـــدخل، أو تتـــدخل قلـــيلاً، فـــى الرابطـــة الكيمائية، مثل الإلكترونات المسماة "د" الخاصة بالفلزات الانتقالية التى تمتد السلسلة الأولى منها، من السكنديوم إلى النحاس مرورًا بالحديد والكوبالت والنيكل، أو مثل الإلكترونات "و" الخاصة بالعناصر الأرضية النادرة (سلسلة تمتد من فلز اللانتـــان إلى اللوتسيوم مرورًا بعنصر الجادولينيوم)، فـــإن هـــذه الـــذرات تحـــتفظ بعـــزم مغناطيسى فى الحالة الصلبة. إن أبسط حالات هذه المواد الصلبة، هى حالة المواد البارامغناطيسية[٩١] (paramagnétique)، أى المتوازية المغناطيسية، حيث تكـــون العزوم المغناطيسية للذرات المختلفة غير منظمة، ويكـــون العـــزم الكلـــى للمـــادة المتوازية المغناطيسية، هو المجموع الموجه للعزوم غير المنظمة، ويكـــون هـــذا العزم الكلى صفرًا فى ظل مجال صفر. وعندما نعرض هذه المادة لمجـــال يكـــون العزم متناسبًا طرديًا معه وفى اتجاهه نفسه.

(٩١) أى مواد لديها انفانية مغناطيسية تزيد على الواحد مثل الحديد والكوبالت. (المترجم)

السلوك الجماعى للعزوم المغناطيسية الذرية

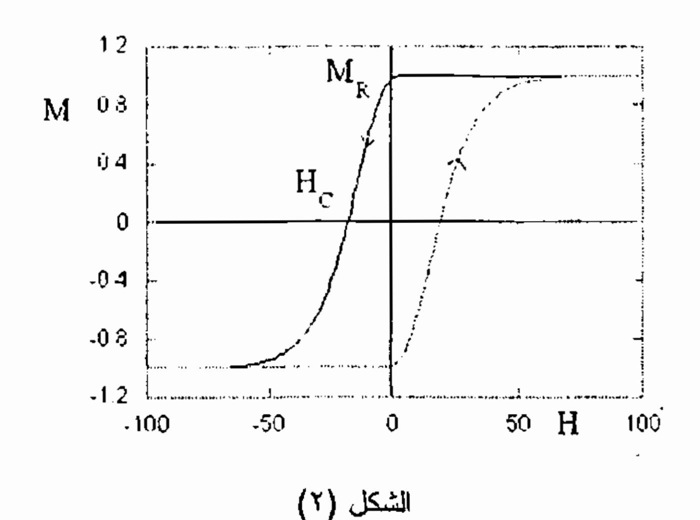
إن العزوم المغناطيسية للذرات المختلفة تتفاعل فيما بينها، بطريقة مباشرة فيما يسمى التفاعل ثنائى القطب (يتفاعل المجال المغناطيسى الناجم عن عزم مغناطيسى مع عزم مغناطيسى آخر ليجعله مصطفًا فى المجال المغناطيسى الناتج)، لكنها تتفاعل أيضا، وبشكل خاص، عن طريق تأثيرات أكثر دقة تسمى تفاعل التبادل، محدثة طاقة تفاعل بين العزوم المغناطيسية للذرتين. ويوجد نوعان من التفاعلات: التفاعل ذو المغناطيسية الحديدية الذى يشجع التشكيل الذى يكون فيه العزمان المغناطيسيان متوازيين (وفى الاتجاه نفسه)، والتفاعل ذو المغناطيسية الحديدية المضادة الذى يشجع الوضع الذى يكون فيه العزمان متوازيين ومتضادين فى الاتجاه. إن المادة ذات المغناطيسية الحديدية، هى مادة تكون كل التفاعلات فيها ذات مغناطيسية حديدية. وبالتالى يكون لديها عزم دائم غير مجهرى (يرى بالعين المجردة) وهو عبارة عن مجموع كل العزوم المغناطيسية لذراتها (وهى كلها متوازية). أما المادة ذات المغناطيسية الحديدية المضادة، فإن عزومها تكون على التوالى فى اتجاه ثم فى الاتجاه الآخر، إن سلوكها بشكل إجمالى مثل سلوك مادة بارامغناطيسية بما أن عزمها الكلى (مجموع العزوم المغناطيسية الذرية أو التمغنط) يكون هو أيضًا صفرًا فى غياب أى مجال خارجى. لقد وضع بيير ويس (Pierre Weiss) نظرية المغناطيسية الحديدية فى بداية القرن العشرين، أما نظرية المغناطيسية الحديدية المضادة فوضعها لويس نيل (Louis Néel) عام ١٩٣٢ (جائزة نوبل ١٩٧٠).

لكن هذا الوصف للنظام لا يكون صحيحًا إلا عند الصفر المطلق، أما إذا تم زيادة الحرارة، فإن تنافسًا يحدث بين آليتين، من ناحية، تتجه الحرارة إلى تشجيع الاضطراب الحرارى، ومن ثم اختلال نظام العزوم وطاقة التفاعل، ومن ناحية أخرى، تتجه الحرارة إلى اصطفاف هذه العزوم. هناك، إذن، درجة حرارة تسمى درجة حرارة كورى (بالنسبة لمادة ذات مغناطيسية حديدية) حيث يكون اللف الذاتى لكل الذرات منظمًا ومرتبًا عند درجات الحرارة الأدنى منها. أما عند

درجات الحرارة الأعلى من درجة حرارة كورى فإن الفوضى تتغلب على النظام، وتصبح المادة الصلبة مادة بارا مغناطيسية (paramagnétique).

المواد ذات المغناطيسية الحديدية

إن أغلب المواد المغناطيسية المستخدمة فى التطبيقات العملية هى مواد ذات مغناطيسية حديدية. يوصف سلوك المادة ذات المغناطيسية الحديدية عند تعرضـــها لمجال بما يسمى دورة تخلفية مغناطيسية (الشكل رقم ٢). إذا انطلقنا مـــن وضـــع يكون فيه العزم الكلى لجسم ذى مغناطيسية حديدية صفرًا ويتم تعريـــضه لمجـــال، فإن العزم المغناطيسى المقاس سينمو بسرعة كبيرة، إلى أن يصل إلى وضع تكون فيه كل العزوم المغناطيســية الذرية مصطفة مع المجال الخـــارجى، إنهـــا حالـــة التشبع التى توازى بالنـــســـبة للحديـــد الفلـــزى، مـــثلاً، ٢,٢ مغنيطـــون بـــوهر (magnéton de Bohr) لكل ذرة. وبعد ذلك، إذا خفضنا المجال لإلغائه، لا يكـــون المنحنى قابلاً للانعكاس، وفى حالة انعدام المجال الخارجى يتبقى عزم مغناطيـــسى كلى أو تمغنط متخلف، ولإلغاء هذا العزم يتعين تعريض المادة لمجال مغناطيـــسى سلبى (المجال القهرى champ coercitif).



الشكل (٢)

دورة تخلفية مغناطيسية. بعد حالـة التـشبع، يـؤدى خفـض المجـال المغناطيسى الخارجى إلى التمغنط المتخلف M_R، ويتعين لإلغاء التمغـنط ثانية تعريض المادة لمجال مغناطيسى سلبى كاف، المجال القهرى H_C.

إن نظرية الحقول (domaines) تفسر بشكل أساسى هذه الـدورة التخلفيـة المغناطيسية. عندما اقترح بيير ويس (Pierre Weiss) نظريته الخاصـة بـالمواد المغناطيسية الحديدية والاصطفاف التلقائى للعزوم المغناطيسية الذرية، خطر تلقائيًا على باله اعتراض: لماذا توجد حالات مغناطيسية حديدية يكـون التمغـنط فيهـا صفرًا؟ وعثر على الإجابة: تخلق المادة ذات المغناطيسية الحديديـة فـى حالتهـا المنظمة تمامًا، مجالاً مغناطيسيًا كبيرًا خارجها، لكنها تخلق أيضًا مجالاً مغناطيسيًا كبيرًا داخلها هى ذاتها، وهذا المجال المسمى المجال المزيل للتمغنط يكون مـضادًا للتمغنط، وبالتالى فإن تفاعله مع العزوم المغناطيسية يكلف طاقة. وللتقليل من هـذا التأثير، اقترح Pierre Weiss أن تتكون المادة ذات المغناطيسية الحديدية، فى حالة عدم وجود مجال خارجى، من حقول تمغنط عديدة ومتضادة، تعمل على التقليل من المجال المزيل للتمغنط أو إلغائه، وهو بالفعل ما يتم ملاحظته. ويتم إذن فهم منحنى التخلفية المغناطيسية الموصوف عاليه: كان للعينة فى البداية تكوين علـى شـكل

حقول وتمغنط صفرى. وقام المجال المغناطيسى بنقل حواجز الحقول إلى أن ألغاها وصولاً إلى التشبع. وعندما يتم خفض المجال، يمكن خلق حقول، إلا أن ذلك يكلف طاقة (طاقة الحاجز) ومن ثم يتبقى تمغنط متخلف.

التطبيقات

المغناطيسات الدائمة أو المواد القاسية:

تصنف المواد ذات المغناطيسية الحديدية تبعًا لقيمة مجالاتها القهرية، فالمواد المسماة قاسية هى المواد ذات المجال القهرى الكبير، أما المواد اللينة فهى ذات المجال القهرى الضعيف (تاريخيًا، كانت أنواع الفولاذ اللينة ميكانيكيًا هى ذات المجال القهرى الأضعف). تعتبر المغناطيسات الدائمة أكثر المواد المغناطيسية إثارة: إن المغناطيس الدائم هو مادة ذات مغناطيسية حديدية مجالها القهرى قوى، إنها مادة قاسية. يتم مغنطة هذا المغناطيس حتى التشبع، ثم يتم إلغاء المجال الخارجى، وبما أن لديه مجال قهرى مرتفع جدًا، فإنه يحتفظ بتمغنط قوى. وتصنع المغناطيسات الدائمة الحديثة من سبائك من فلزات العناصر الأرضية النادرة، ومن الحديد والكوبالت. إن الاستخدام الأكثر انتشارًا لهذه المغناطيسات الدائمة هو صناعة المحركات الكهربية. لكنها تستخدم أيضًا فى العديد من أجهزة الرصد.

المواد اللينة:

تستخدم المواد اللينة، الذى يعد الفولاذ بالسيليسيوم نموذجًا لها، فى صناعة المحولات. يتكون المحول من حلقة مغناطيسية، حولها ملف كهربى عدد لفاته (ن) يقوم بمغنطة المادة، وتنتقل تغيرات الدفق الناجمة (إذا كان التيار مترددًا) عبر المغناطيس إلى ملف آخر عدد لفاته (م) محدثًا فى هذه اللفات قوة محركة كهربية، وتعطى نسبة عدد اللفات م/ن النسبة بين فرقى الجهد. يعمل المغناطيس الكهربى طبقًا للمبدأ نفسه، لكن مع دائرة مستثيرة واحدة وقطع فى المادة المغناطيسية،

الفرجة بين قطبى مغناطيس كهربى،[٩٢] حيث يمكن استخدام المجال المغناطيسى الناتج. كما تستعمل المواد اللينة فى مولدات التيار المتردد وفى العديد من أجهزة التقنية الكهربية.

التسجيل المغناطيسى:

يعتبر التسجيل المغناطيسى تطبيقًا شائعًا آخر. إن مبدأ التسجيل المغناطيسى بسيط للغاية، تستخدم التخلفية المغناطيسية للمواد المغناطيسية لتخزين المعلومات، حيث تقوم إشارة دخول بمغنطة الوسائط (إسطوانة أو شريط تسجيل) وتحتفظ الوسائط بعد ذلك بعزم مغناطيسى يتناسب مع الإشارة (فى الحالة القياسية) أو عزم فى اتجاه معين (الواحد) أو فى الاتجاه الآخر (الصفر) فى الحالة الرقمية. ثم فى حالة القراءة، يمر الرأس أمام الشريط أو الإسطوانة ويرصد تغيرات الدفق فى وجود أو غياب العزم المغناطيسى. وتتكون الوسائط بشكل عام من مواد ذات مغناطيسية حديدية، فالأشرطة المغناطيسية تتكون من حبيبات صغيرة من مواد مختلفة (أكاسيد حديد وكروم وحديد فلزى) موزعة فى قالب من البلاستيك. وتحتوى إسطوانات الحاسوب الصلبة على طبقة رقيقة من مادة مغناطيسية رسبت بواسطة التقنيات الحديثة وحفرت فى شكل خطوط دائرية.

الأبحاث الحالية

لقد حفز اكتشاف تم فى Orsay عام ١٩٩٨ الأبحاث الحالية الخاصة بالمواد المغناطيسية. إن الأمر يتعلق بالمقاومة العملاقة. تتوقف مقاومة فلز مغناطيسى عادى على المجال المغناطيسى الخارجى الذى يتعرض له، غير أن هذا التأثير ضعيف جدًّا، ولذلك أثار اكتشاف مجموعة ألبرت فيرت (Albert Fert) فى Orsay عام ١٩٩٨ دهشة عالم المغناطيسية. لقد قاس هؤلاء الباحثون مقاومة مادة

(٩٢) جزء من دائرة مغناطيسية مغلقة حيث لا يسرى الدفق المغناطيسى فى الحديد. (المترجم)

متعددة الطبقات من الحديد والكروم (تراص من عشرات الطبقات المتماثلة من الحديد والكروم سمك كل منها بحدود النانومتر، أى واحد على مليار من المتر) عند تعرضها لمجال مغناطيسى، ووجدوا تغيرًا كبيرًا جدًّا فى المقاومة (عدة عشرات فى المائة) عند تعرض المادة لمجالات خارجية متواضعة نسبيًا. وقام ألبرت فيرت (Albert Fert) بتفسير التأثير الذى تم رصده. كان معروفًا منذ الستينيات من القرن العشرين، أن فى فلز ذى مغناطيسية حديدية تكون المقاومة النوعية للإلكترونات مختلفة تبعًا لنوع اللف الذاتى لكل منها. فالإلكترونات التى يكون اتجاه اللف الذاتى الخاص بها موازيًا ومضادًا لاتجاه التمغنط، تقوم بالتوصيل بشكل أفضل من تلك التى يكون اتجاه اللف الذاتى الخاص بها موازيًا وفى اتجاه هذا التمغنط نفسه (أو العكس تبعًا للفلزات). بالنسبة للمادة المتعددة الطبقات من الحديد والكروم، تتعرض طبقتان متجاورتان من الحديد لتفاعل مضاد للمغناطيسية الحديدية عبر طبقة الكروم، وبالتالى يكون عزمهما المغناطيسى متضادًا فى ظل مجال صفرى، فى حين يدمر مجال مرتفع هذا النظام المضاد للمغناطيسية الحديدية بأن يجعل كل العزوم متوازية. فى حالة المجال الصفرى، يكون اللف الذاتى لإلكترون ما متوازيًا وفى اتجاه التمغنط نفسه فى طبقة، ومتوازيا وفى اتجاه مضاد للتمغنط فى الطبقة المجاورة، وتكون المقاومة هى متوسط مقاومة زوج اللف الذاتى. أما فى حالة المجال المرتفع، فإن اللف الذاتى لإلكترون ما إما أن يكون متوازيًا دائمًا للتمغنط وتكون المقاومة كبيرة، أو يكون لفه الذاتى متضادًا دائمًا مع اتجاه التمغنط، وبالتالى تكون المقاومة ضعيفة جدًّا. وتنتج المقاومة المغناطيسية العملاقة من هذا التأثير الخاص بدائرة القصر بالنسبة لجزء من الإلكترونات (إن إلكترونًا واحدًا فى صحة جيدة أفضل من إلكترونين نصف مرضى).

لقد شجع هذا الاكتشاف البحث التكنولوجى الخاص بأجهزة رصد جديدة للمجالات المغناطيسية، واستخدمت تقنيات الحفر والترسيب التى كانت قد تطورت فى مجال أشباه الموصلات خلال الثمانينيات من القرن العشرين، لإنتاج أجهزة منحوتة فى طبقات رقيقة جدًّا. ولأجهزة الرصد هذه تطبيقات عديدة (فى نظام

فرامل AB S للسيارات مثلا) لكنها تستخدم أساسًا فى الرؤوس القارئة للإسطوانات الصلبة الخاصة بالحاسوب.

تنقسم الرأس المغناطيسية المقاومة النموذجية إلى جزئين، رأس للكتابة وهى عبارة عن ملف مولد للمجال، ورأس للقراءة وهى عبارة عن مغناطيس ذى مقاومة. منذ بدء استخدام الرؤوس المغناطيسية ذات المقاومة، تضاعفت سرعة زيادة سعة الإسطوانات الصلبة، لقد قاربت هذه السعة حاليًا مليار بيتة لكل سنتيمتر مربع (تبلغ سعة إسطوانة نمطية حالية ٢ مليار بيتة لكن على مساحة أكبر بكثير من ٢ سنتيمتر مربع). كانت أول رؤوس ذات مقاومة مغناطيسية تعتمد على المقاومة المغناطيسية التقليدية، مع استخدامها لتقنيات الحفر والأغشية الرقيقة، بينما استخدم الجيل الثانى التأثير الذى اكتشفه ألبرت فيرت (Albert Fert). وأخيرًا سيعتمد الجيل الثالث على تأثير جديد، ألا وهو المقاومة المغناطيسية النفقية.

فى بداية عقد التسعينيات من القرن العشرين، أعاد باحثون فى MIT ببوسطن اكتشاف تأثير النفق المستقطب فى شكل لف ذاتى، الذى كان جوليير (Jullière) قد بينه فى السبعينيات من القرن العشرين فى Rennes. ومنذ ذلك الحين وهذا التأثير محل منافسة محمومة على جانبى الأطلسى لتحضير أجهزة الرصد المستقبلية. إن الفيزياء الأساسية بسيطة جدًا، يتم إعداد جسم حيث تفصل طبقة عازلة رقيقة جدًا (بضعة نانومترات)، بين طبقتين من مادة ذات مغناطيسية حديدية، ويتم إيجاد وسيلة تجعل من الممكن أن يكون تمغنط الطبقتين المغناطيسيتين متوازيا وفى الاتجاه نفسه، ثم متوازيًا ومتضادًا فى الاتجاه، وأخيرًا يتم قياس التيار الذى انتقل عبر الطبقة العازلة فى الحالتين. ويمكن للتيار أن يختلف اختلافًا ضخمًا بين الترتيبين المغناطيسيين. إن إمكانية جعل تيار يمر عبر مادة عازلة رقيقة جدًا هى أحد التأثيرات المحضة لفيزياء الكم وترجع للسمة الموجية للإلكترونات، فالإلكترونات تمر عبر المادة العازلة التى كان يتعين عليها إيقافها، مثل الضوء الذى يمر عبر طبقة رقيقة جدًا من المعدن بينما كان يتعين أن ينعكس

عليها بالكامل. إن أهمية الطبقات ذات المقاومة المغناطيسية العملاقة ترجع إلى أن مقاومة الجهاز تكون كبيرة نسبيًا، وهو ما يسمح بجعل هذا الجهاز صغيرًا جدًا.

إن وجود نوعين من الإلكترونات فى مادة ذات مغناطيسية حديدية (إلكترونات ذات لف ذاتى متوازى مع اتجاه التمغنط، وإلكترونات ذات لف ذاتى اتجاهه مضاد لاتجاه التمغنط) لكل منهما سلوك نقل مختلف، قاد علماء المغناطيسية إلى تشبيه ذلك بأشباه الموصلات، حيث يحدث نوعا الشحنات، الإلكترونات والفجوات، خواصًا هى أساس علم الإلكترونيات الحديث. وبالتالى تم ابتكار الترانزستور المغناطيسى: يتكون الترانستور المغناطيسى النمطى من ثلاث طبقات مع قطب تحكم، الشبكة، التى تتحكم فى مرور التيار بين الطبقتين الأخريين.

ويتم التطلع إلى العديد من تطبيقات هذا الترانزستور المغناطيسى مثل أجهزة الرصد، وأجهزة قياس الأقطاب الممغنطة، والتسجيل، وعلم الإلكترونيات بكل ما فى الكلمة من معنى (استبدال ترانزستور أشباه الموصلات)، لكن بشكل خاص الذاكرات غير الطيارة. حاليًا، تتكون الذاكرة المركزية لأى حاسوب من أشباه موصلات، وهى تتطلب إنعاشًا مستمرًا، خاصة أنها تفقد كل معلوماتها عند فصل التيار عنها. فى الجهاز ذى الذاكرة المغناطيسية، يتكون عنصر الذاكرة الفردى من ثلاث طبقات مثل الموصوفة عاليه، وتكون حالتا الصفر والواحد هما حالتا التمغنط المتوازى والتمغنط ذو التوازى المضاد، وأزمنة الوصول الخاصة بهذا النوع من الذاكرة مساوية تقريبًا لتلك الخاصة بأشباه الموصلات، لكنها تتميز عنها بميزة كبيرة وهى أنها دائمة، إذ لا يتم مسحها عند قطع التيار عنها. ويسمى هذا النوع من الذاكرة (MRAM) أى ذاكرة مغناطيسية ذات وصول عشوائى.

خاتمة صغيرة

لقد صاحبت المواد المغناطيسية باستمرار، تاريخ التقدم التقنى منذ بداية العصر الحديدى. فاستخدام البوصلة سمح بنمو التجارة البحرية التى هى أصل

الثورة الصناعية الأولى. وسمحت اكتشافات أورستد وفاراداى فى القـــرن التاســـع عشر بتطوير المحركات الكهربية ومولدات التيار المتنـــاوب، وأدت إلـــى الثـــورة الصناعية الثانية. كما تم استخدام العديد من أجهزة الذاكرة المغناطيـــسية، وســـيتم استخدامها فى أجهزة الحاسوب وآلات التسجيل التى تأذن بالثورة الصناعية الثالثة، ثورة المعلومات والاتصالات.

إن البحث العلمى الحالى فى مجال المواد المغناطيسية خصب جدًا، ويجرى تطوير سبل جديدة مثل أبحاث إلكترونيات اللف الذاتى التى ربما ســـتكون التقنيـــة السائدة بالنسبة للآلات الذكية فى بداية القرن الواحد والعشرين.

الباب الثامن

الكيمياء

علم التحويلات

كيمياء الجزيئات الفائقة[١]

بقلم: جون مارى لين

Jean - Marie LEIN

ترجمة: عزت عامر

من الانفجار العظيم حتى ظهور الإنسان، ومن الجسيمات الأولية حتى الكائن الحى، يعتبر الكون الذى ندركه متضمنًا فى مجمله القوانين التى تحكم المادة. وتندمج الجسيمات تحت الذرية على هيئة ذرات، وتكوّن الذرات الجزيئات، وتتجمع الجزيئات على هيئة بنى من الجزيئات الفائقة supramoleculaire، ثم على هيئة خلايا، وفى النهاية على هيئة كائنات حية، وتلك هى السلسلة الطويلة للعناصر الأساسية فى حالة التركيب التى نكتشفها بالتدريج.

والكيمياء، علم المادة وتحويلاتها ترسم لنا طريق هذه الاكتشافات. ودورها الأول هو فهم، وتحليل العالم المحيط بنا دون "الإقلال" من تعقده الرهيب. وبالإضافة إلى ذلك فإنه بفضلها تصبح هذه المجموعة الهائلة من البنى الممثلة للعالم المجهرى microscopique أكثر ألفة لدينا يومًا بعد يوم. وتظهر لنا بنيته العميقة، وتصبح تحويلاته سهلة البلوغ بالنسبة إلينا. ويصبح لدينا "دور" جديد، ومن مشاهدين نتحول إلى ممثلين ومبدعين.

وقد يكون فى غير محله وصف مدى التحام الكيمياء بتاريخ البشر. ومع ذلك فلنقدم نبذة سريعة، وهى بالتأكيد غير كاملة، عن تطور الكيمياء ونماذجها paradigms. فى وقت مبكر جدا سعى الإنسان إلى فهم المادة بهدف الوصول إلى أفضل سيطرة عليها. وكانت هناك بشكل خاص افتراضات وتخمينات الإغريق التى قطعت العصور لتصل إلينا.

---

(١) نص المحاضرة رقم ٢٣١ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٨ أغسطس ٢٠٠٠.

ومن جانب آخر، كانت، كما هو الحال بالنسبة لمجالات أخرى عديدة، أصل ميلاد العصر الوسيط. وكانت تلك النماذج أكثر انتماء للنظرية والفلسفة أكثر من كونها قائمة على الوقائع التجريبية.

وكان إمبيدوقليس Empedocle، خمسة قرون قبل عصرنا، يفهم المادة بمصطلحات العناصر الأربعة: النار، والهواء، والماء والتراب تعطى معًا خواص الحار والرطب والبارد والجاف. ولم يوضع هذا المفهوم موضع الشك إلا متأخرًا جدا وترك مكانه نهائيًا لمنهج جديد قائم على التحليل. وكان طموح علماء الكيمياء فى عصر النهضة، كما هو طموحنا، الفهم عن طريق تحليل الكلى إلى مجموعة من المركبات الأكثر بساطة، عن طريق عمليات مثل التقطير، والذوبان، والبلورة... إلخ.

وهكذا بالقدرة على التجريب والتحليل الأكثر فالأكثر دقة تمكنًا من فهم أن المادة كانت فى الواقع مركبة من لبنات، من عناصر لا تتجزأ، وعدنا إلى فكرة الذرات التى قدمها ديمقريطس Democrite. وشيئًا فشيئًا ظهر منافس للعناصر الأربعة فى يوم ما، دون أن يتمكن أحد أخيرًا من فهمه أو تنظيمه. وتم التحقق عندئذ من أن عنصرًا محددًا يتحد بسهولة مع عنصر آخر محدد أو أيضا أن عنصرين آخرين لهما خواص متشابهة، أو أنهما مختلفان جذريًا. وتم البحث عن تصنيفهما، وتجميعهما فى إطار معادن، وغازات، وأحماض.. إلخ. واقتضى الأمر أيضا العثور على علاقات بين المنتجات التى تم الحصول عليها خلال التحول الكيميائى والمركبات التى تم البدء بها. وتم وضع قانون، الذى مثل نقطة انطلاق الكيمياء المعاصرة، وقدمه لافوازيه Lavoisier بتلك العبارات المعروفة جيدًا: "ليس هناك ما يوجد من العدم وليس هناك ما يُفقد، كل شيء يتحول".

وفتح مندلييف Mendeleiev حينئذ أمام الكيمياء آفاقًا غير مسبوقة عندما قدّم جدوله الدورى المشهور. وكان لدى هذا العالم الشاب الروسى رؤية للنظام المخبأ خلف الفوضى الظاهرة، ونجح فى أن يجمّع فى نفس الجدول، المتماسك والمنظم،

مجموعة العناصر المعروفة فى ذلك العصر. والعناصر الموجودة فى نفس العمود لها بالفعل خواص متماثلة، والمعادن توجد مع المعادن، وكانت الأملاح متجمعة... وبالتأكيد كانت هناك فجوات (وكانت لا تزال متعددة) توشى تصنيف ماندلييف، لكنه أثبت أنها لا تحوى سوى عناصر تناظرها كان يجب اكتشافها لملء تلك الفراغات. ورغم شكوكية أنداده، جاء التاريخ بسرعة بالإجابة، كان مندلييف على حق وحصلت الكيمياء أخيرًا على حجر رشيد الخاص بها.

وتبقى حينئذ، والجدول الدورى متاح، معرفة كيفية استخدامه. كان من المفهوم أن العناصر تتحد، وأن هناك نوعًا ما من "الربط" بينها. فالأكسجين، كما تأكد مثلاً، يرتبط بسهولة مع الكربون. وتم تطوير نموذجين، مع البحث حينئذ عن مسلك للصيغة الطبيعية، حيث يتم ببساطة إحصاء عناصر مركب ما، فى الصيغة الموسعة، تكون فيها الارتباطات بين العناصر واضحة.

ويمكن ذكر كيكيل Kekule، وفورتز Wortz ولوشمدت Loschmidt الذين قدموا ثلاثتهم نماذجًا لوصف الصيغة الكيميائية للمركبات. لكنهم وقعوا فى خطأ مشترك هو التسطح، أى أنهم اقتصروا على الإشارة إلى أن الذرة المحددة ترتبط بذرة ما أخرى، دون أن يضعوا فى اعتبارهم الطبيعة ثلاثية الأبعاد للمجموعة. وبواسطة فانت هوف Van`t Hoff ولو بيل Le Bell ظهرت الصيغة الكيميائية، واتضح أن هندسة الجزيئات فى المكان لها أهمية أساسية. وليست الهندسة وحدها بل أيضا التنظيم النسبى للذرات فى الجزئ كما أوضح باستير Pasteur باكتشافه تراكب الصور[٢] chiralite. وفى الواقع فإن الجزيئات، وبشكل أساسى جزيئات الكائن الحى تكون موجهة، وكما أن له يدًا يسرى بالنسبة ليد يمنى، يمكن لمركب "أيسر" أن يكون له تأثيرات على الكائن الحى مختلفة تمامًا عن مركبه فى المرآة، "الأيمن". وهكذا بالتدريج تطورت النماذج التى أوضحت تطور الإنسان من المادة حتى وصلت إلى النماذج التى نستخدمها حاليًا. لكن عالم الكيمياء لم ينتظر، كثيرًا لحسن الحظ، حتى

---

(٢) تراكب الصور chiralite: تقال لجسم ليس قابلاً للتراكب مع صورته فى مرآة مستوية. وعندما يكون جزيئان فى حالة تراكب صور فإن كل منهما يكون صورة للآخر. (المترجم)

تتم صياغة كل شيء لكي ينجز عمله في الدراسة والابتكار. واستخراج المركبات الطبيعية، وخاصة تركيب الجزيئات الذي لم يتوقف أبدًا عن التطور.

ويمثل التوصل إلى تخليق البولينا بواسطة فوهلر Woehler في ١٨٢٨، قبل مندلييف Mendeleiev وباستير Pasteur بكثير، مرحلة مهمة (الشكل ١). ولأول مرة يتم الحصول على جزئ عضوى، أى ينتمي إلى عالم بيولوجي، غير حي ex vivo، وفقط عن طريق مركبات معدنية، غير عضوية. وأدى ذلك حينئذ إلى دحض شبه العقيدة بوجود "قوة حيوية" التي افترضت أن أى كائن حي لا بد أن يتكون من مركبات عضوية. وهكذا كتب فوهلر Woehler في ٢٨ فبراير ١٨٢٨ إلى بيرزليوس Berzelius: "أستطيع صناعة البولينا دون الحاجة إلى كلية، أو باختصار أى حيوان، سيان كان إنسانًا أو كلبًا".

وتطوّر التخليق العضوى بسرعة، مما أثرى بلا توقف مجموعة أدواته باكتشاف تفاعلات جديدة وبوضع استراتيجية للحصول على مواد طبيعية أكثر فأكثر تعقيدًا. وبواسطة سلسلة من التحققات المبهرة، حيث توحدت لباقة الاستراتيجيات مع مآثر العوائد والاختيارات، انتهت إلى تركيبات عظيمة خلال السنوات الثلاثين الأخيرة، وخاصة تلك التي حازت القبول باعتبارها مفخرة، ألا وهي تركيب فيتامين B12 (الشكل١). وخلال ما يقرب من مائة وخمسين عامًا فيما بعد فوهلر Woehler أمكن كذلك الحصول على هذا الجزئ بالغ التعقيد. واحتاج تخليقه، الذي تم بواسطة فريق من روبرت ب. وودوارد Robert B. Woodward (من جامعة هارفارد) وألبرت إشينموسير Albert Eschenmoser (من ETH زيوريخ)، نحو مائة مرحلة وما يقرب من مائة شخص للمشاركة في التخليق.

ويعتبر هذا الاستغلال التخليقي synthetique قمة للكيمياء العضوية. ويتيح إثبات أن التخليق العملي لأى جزئ أيًا كان أصبح ممكنًا، بالنسبة لهذه القلة التي أتاحت وسائل تنفيذ ذلك، وبهذا التحقق بلغت الكيمياء الجزيئية رشدها واكتسبت شرف اسمها. ولكن لا يجب مع ذلك أن نرى في هذه النتيجة، وهو أمر مستبعد، نهاية الطريق.

إن هذه الكيمياء التى نتحدث عنها، والتى تركز على الجزئ، لن تستقر بأى شكل إلا على علاقات قوية، تلك التى يطلق عليها "تكافؤات إسهامية covalentes"، التى ترتبط بواسطتها الذرات لتكوين جزيئات. وطبيعتها تختلف من نـوع لآخـر: فهى قوى الكهرباء الاستاتيكية electrostatiques، والروابط الهيدروجينية، وقـوى فان دير فالVan der Waal، إلخ. ولأنها بشكل عام لا يعتد بها بالنـسبة لـروابط التكافؤ، يتم "إهمالها" حيث يتم التركيز على الجزئ نفسه. ولكن حيث يـتم فحـص المركب فى بيئتها، بحثًا عن معرفة التأثيرات الواقعة عليـه بواسـطة الجزيئـات الأخرى، فإن تلك "التفاعلات الضعيفة" تصبح أولية.

Vitamine B_{12}

Urée

1828

الشكل (١)

مرحلتان رئيسيتان للكيمياء الجزيئية: تركيب البولينا (١٨٢٨) وفتامين ب ١٢ B12 (١٩٧٦)

وفى الواقع هناك نوعان يتفاعلان، غير أنهما "يرتبطان" بالمعنى الكلاسيكى للكلمة، ويمكن أن يتشاركا بقوة أكثر أو أقل ويؤثران إلى حد ما بحيث يمكن لأحدهما أن يساعد الآخر فى إنجاز تحويل كيميائى. وهذه هى الوظيفة المشهورة بالتحفيز catalyse.

وهكذا فيما وراء الكيمياء الجزيئية، هناك نطاق يمكن أن يطلق عليه الجزيئى الفائق supramoleculaire، تهيمن عليه تفاعلات جزيئية، وترابطات associations نوعين أو أكثر من الأنواع الكيميائية، ومن "المركبات"، والروابط ما بين الجزيئات.

ويعتبر مجال كيمياء التفاعلات الجزيئية بالغ الاتساع. وهذا العلم هو بشكل ما نوع من ميتاكيمياء (كيمياء عليا) ويمتد فيما وراء المكان، نحو منظومة الأجرام السماوية المترابطة ويوجه تلك البنى التى تكون هشة أحيانًا وهى صروح ما بين الجزيئات.

وفى مجال البيولوجيا نجد دور هذه التفاعلات الجزيئية أكثر وضوحًا. فهى تدخل فى كل مكان وفى كل لحظة بين الجزيئات البيولوجية والعمليات التى تحكم الحياة: فالإنزيمات تستقبل داخلها أنواعًا مضبوطة تمامًا، لكى تؤثر على تحويلاتها، وتبادر الهرمونات إلى التعلق بمستقبلاتها، وتندمج وحدات بروتينية[٣] proteiniques لتكوين الهيموجلوبين hemoglobine (خضاب الدم)، وتتعرف الكرات الدموية البيضاء على الأجسام المعادية وتدمرها، ويجد فيروس الإيدز sida طريقه إلى هدفه لغزوه، وتنتقل الشفرة الوراثية بتسجيل وقراءة أحرف هجاء القواعد البروتينية.. والأمثلة لا تعد ولا تحصى! وكل تلك الآلات الرائعة ليست مع ذلك جزيئات "بسيطة"!

---

(٣) بروتينى proteiniques: البروتينات من المواد الرئيسية التى يتكون منها غذاء الإنسان والحيوان وهى ضرورية لنمو الجسم وتكوين العضلات ولتعويض الاحتراق الداخلى وتكثر فى اللبن والبيض واللحم. (المترجم)

كيف يمكن لهذه المادة، على الحد الفاصل بين الجماد والحى، أن تكون مقياسًا لتحقق هذه العمليات المتعددة وبكل هذا التنوع؟

ومن الواضح أن تلك التفاعلات وتحويلاتها البيولوجية انتقائية بوضوح. ويجب بالضرورة أن تكون قائمة على صفة عامة مما يجعل جزيئين لترابط ما يتعرفان أو يجهلان رفيقهما الآخر. وأول من أدرك هذه الظاهرة وتوصل بوضوح إلى طبيعتها هو إميل فيشر Emil Fischer. ونوعية تفاعل أى إنزيم مع ركيزته[٤] substrat (الجزئ الذى "يمسك به" من أجل نقله) قادته، منذ ١٨٩٤، إلى نتيجة مؤداها أنه لكى يتم التعارف والدخول فى التفاعل، تصبح الجزيئات والركائز والمستقبل متوافقة، كما هو الأمر بالنسبة للمفتاح والقفل. وتلك صورة ما زالت مقبولة فى عصرنا، حتى لو تم التوسع فى تصورات المفتاح والقفل وجعلها دقيقة. ونعطى الآن وصف "التعارف الجزيئى" لهذه الظاهرة.

ومن المهم إدراك حقيقة أن التفاعل الذى يبدأ تشغيل التعارف الجزيئى يكون "مُطَّلِع"، أى أن هناك معلومة متضمنة. ويمكن القول بأن إنزيم ما لا يهتدى إلا إلى جزئ واحد (ركيزته)، ومن ثم فهو مبنى لهذا الهدف الوحيد وبنيته تنطوى حتمًا، بشكل متأصل، على معلومات حول ركيزته، إنها محفورة فيه، "محفوظة عن ظهر قلب".

والمثال الأكثر أهمية لظاهرة الاطلاع هى بالطبع تخزين، ونقل، وقراءة ونسخ المعلومات الوراثية. وتلك العملية المركبة لا تقوم فى الواقع إلا على تفاعلين! ويختص الأمر من أحد جوانبه بالتفاعل المزدوج بين قاعدتى الأدينين والثيامين، ومن جانب آخر بالتفاعل الثلاثى بين قاعدتى الجوانين والسيتوزين، التى تتكون منها كسر الدنا ADN (الشكل ٢). ويشكل هذان الزوجان من القواعد بهذه الطريقة منظومة زوجية لقراءة المعلومات.

---

(٤) الركيزة substrat: مركب يتفاعل مع المقر (الموقع) الفعال فى الإنزيم فيتغير خلال تلك التفاعل. والمصطلح هو الاسم العام للمادة التى يعمل فيها الإنزيم. (المترجم)

ويثير إعجابنا فعالية ورشاقة هذه الظواهر ونميل بالطبع إلى تقليدها، بغض النظر عن فهمها بشكل أفضل. ومعالجة التعارف الجزيئى ليس بالتأكيد أمرًا سهلاً. وهو يتعلق، بالنسبة للكيميائيين مثلنا، بمرحلة جديدة، وكما فعل أسلافنا بالكيمياء الجزيئية، يجب علينا أن نكتشف القواعد ونبتكر العمليات التى تتيح لنا تخليق بنى والتحكم فى وظائف صروح تتكون منها تلك الكيمياء الجديدة ألا وهى كيمياء الجزيئات الفائقة.

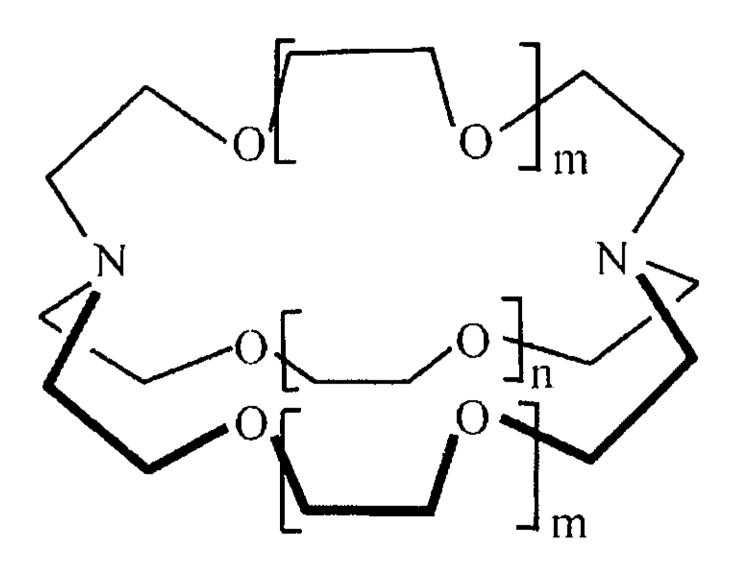
وتفاعل التعارف الجزيئى الأكثر بساطة والذى يمكن تحقيقه فى المختبر هو الأسر الانتقائى لركائز كروية هى أيونات موجبة الشحنة لمواد قلوية، أى، بتسلسل زيادة المقياس، أيونات الليثيوم، والصوديوم، والبوتاسيوم، والروبيديوم وأخيرًا السيزيوم.

الشكل (٢)

ترابطات قواعد تحتوى على أزوت فى جزئ الدنا ADN.

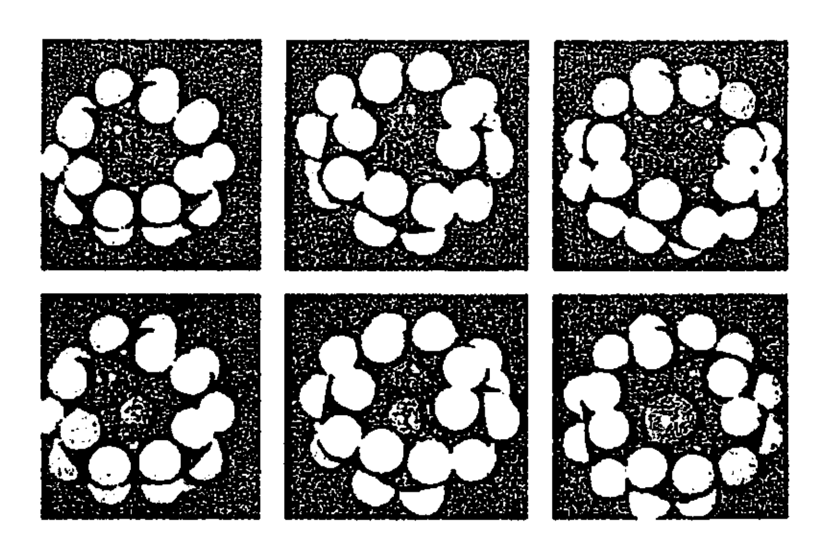
والخطوط المنقطة تشير إلى التفاعلات ما بين الجزيئات.

والاختلافات بين الأقطار ضئيلة جدا (بمقدار جزئ من عشرة من النانومتر). ومع ذلك يمكن التوصل إلى جزيئات مستقبلة قادرة على أن تتضمن بشكل تفاضلي في قلبها تلك الأنواع الكروية. ويطلق على تلك الجزيئات تجويفية cryptant، من كلمة تجويف crypt، لأسباب الفجوة التي تحتوى عليها. وفي مثالنا حول الأيونات القلوية، فإن التجويفية المعنية هي الأزوتات متعددة الأثير متعددة الحلقات الضخمة polyethers macropolycycliques (الشكلان ٣ و ٤). فإذا لعبت دورها، بعيدًا عن عملية تركيبها، بحجم نقاط تربط جدران "القفص"، فإنه من الممكن أن تغير بدقة أبعاد الخزان وأن تحسم من ثم قبل كل شيء أي أيون سوف يتم أسره وبذلك تعتبر "تجويفية".



الشكل (٣)

تمثيل عام لتجويفية cryptant لمركب أيونات موجبة الشحنة من مواد قلوية.



شكل (٤)

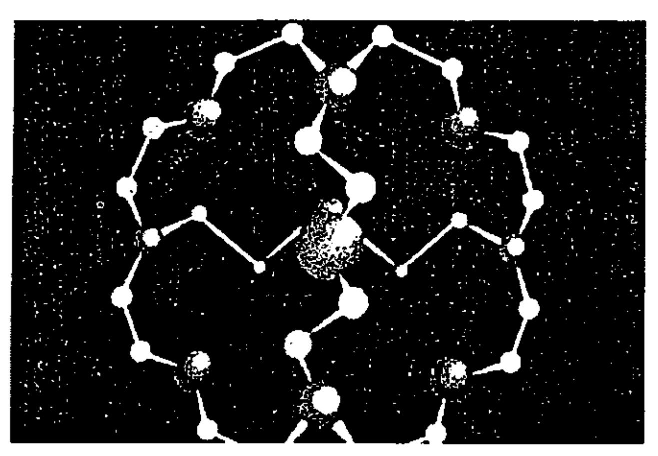
نماذج جزيئية لثلاثة تجويفات بحجم زائد (إلى أعلى)
وتجويفات (تجويفات + ركائز) مناظرة (إلى أسفل).

وكما أنه يبدو بسيطًا جدا، إلا أن هذا التعارف على صلة مباشرة بفهم ظواهر بيولوجية. والعملية الكهربائية التى تحدث فى جدران الخلايا العصبية تقوم بالفعل على اختلاف فى تغير تدريجى متناقص[٥] فى تركيز أيونات الصوديوم والبوتاسيوم حول الغشاء الخلوى. لذلك يجب أن يكون داخل الجدران خلايا عصبية من جزيئات تكون خليقة بالتميز عن تلك الأيونات بإحكام.

ومثال آخر للتعارف الجزيئى يتعلق بالمركبات، "المفاتيح"، على هيئة رباعى السطوح، كما هو الحال مثلاً بالنسبة لأيونات الأمونيوم NH_4. يلزم للروابط الانتقائية لمثل هذه الركيزة أن نفكر ثم نقوم بتركيب جزئ مستقبل يكون فى قلبه نطاق، موقع تعارف رباعى السطوح. والجزئ ذو الحلقات الثلاث الكبيرة macrotricyclique، الموضح فى الشكل ٥، يستوفى تمامًا هذه القاعدة. فهو

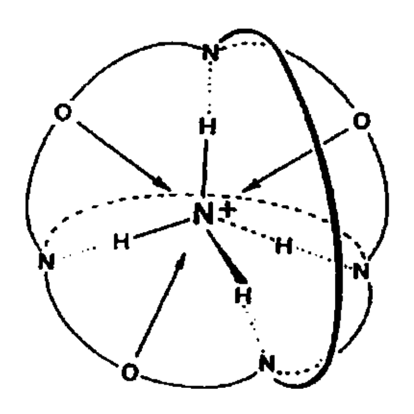
(٥) تغير تدريجى متناقص gradient: تغير تدريجى متناقص ابتداء من نقطة قصوى لتركز مادة أو خاصة فيزيولوجية داخل خلية أو جسم. (المترجم)

يحتوى على أربع ذرات أزوت وست ذرات أكسجين، توجد على التوالى على قمة رباعى أوجه ومجسم ثمانى السطوح. ويأسر هذا الجزئ أيون الأمونيـــوم ليـــشكل مجموعة متزنة جدا (الشكل ٦)، نوع من الجزيئية الفائقة تمثل تكـــاملاً (مفتـــاح - قفل) بين الشريكين.



الشكل (٥)

نموذج جزيئى لتجويفية تعارف رباعية الأسطح.



الشكل (٦)

بنية تجويفية رباعية الأسطح.

والنتيجة الفورية لهذا التطابق هو الـنقص الكبيـر فـي حموضـة أيـون الأمونيوم. ويفقد الأيون في الواقع بشكل سهل بروتونا H^+، وهذا الأخير هو سبب الحموضة. وعندما يتم أسر الأيون، يصبح نقص البروتون deprotonation أكثـر صعوبة بكثير وتهيمن خاصية الحامض. ويوضح ذلك كيف يمكن لخواص ركيـزة أن تتغير عندما ترتبط، مما يوضح كذلك الخواص الجديدة لمجموعة ذات جزيئيـة فائقة، والجزيئية الفائقة، بالنسبة للجزيئات التي تتكون منها.

ومن ناحية مجتمع العديد من فرق الباحثين الذين يعملون في مجال التعارف الجزيئي تم تركيب مستقبلات متنوعة جدا، قادرة على معرفة وربط تنـوع واسـع من الركائز: كروية، ورباعية أسطح، وخطيـة، ومتفرعـة، وعـضوية، وغيـر عضوية... ونضيف أيضا أنه يوجد مستقبلات متطابقة الصورة تتيح التعارف على المواد "الموجهة"، يطلق عليها "نشطة بصريًا" optiquement actives.

والتطبيقات التي يمكن أن نتخيلها في مجال كيمياء الجزيئي الفائق بشكل عام وللتعارف الجزيئي بشكل خاص لا تعد ولا تحصى. والمجال الحي، كمـا نـراه، يتواجد في المقام الأول. ويمكن أن نتخيل مثلاً كيانات قادرة، مثلها مثل الإنزيمات، على التفاعل مع ركيزة معينة، ومع ركيزتها، لإنتاج إشارة يمكننا كشفها. وقد يلعب الجزئ حينئذ دور المجس، فيتسلل لصالحنا في الوسط البيولوجي.

ويمكن لجزيئات أخرى محمولة في الهدف أن تنقل موادًا نشطة إلـى قلـب الهدف الذي يتم اختياره. وقد يكون لدينا حينئذ أحصنة طروادة قادرة على اجتيـاز طريقها، مثل شظية دنا ADN معدة للعلاج الجيني، عبر حواجز تكون عادة غيـر قابلة للتخطي مثل الأغشية الخلوية.

ويمكن لكيمياء الجزيئات الفائقة أن تلعب دورًا رئيسيًا في نطاقـات أخـرى مثل التحفيز، بالطبع، وأيضا في تطبيقات ربما تكون أكثر إثارة للدهشة، وسـوف أجري عما قليل مماثلة بين المعلومات المستمرة في الدنا ADN والنظـام الثنـائي الذي تستخدمه أجهزة الكمبيوتر لدينا. قد يكون في استطاعتنا تحفيز المنطق بـشكل

مسبق ونفكر بالفعل فى استخدام هذه العمليات الجزيئية فى تقنية معلومـــات، بـــأن نبتكر نوعًا ما من المعلوماتية "الجزيئية". والبنى الجزيئية الفائقة جديرة من جانـــب آخر بتوليد إشارات ليست كيميائية، مثل الإلكترونات، والفوتونـــات التـــى يمكـــن إطلاقها واستخدامها.

ولماذا لا نتطلع كذلك إلى ميكانيكا جزيئية؟ قد يستطيع الجزئ أن يلعب دور ترس، أو مكبس أو ذراع نقل! ويعتبر تناسخ الدنا ADN فى حـــد ذاتـــه مركـــز التحركات على مستوى النانومتر.

هناك بالتالى طرق مختلفة أصبحت مفتوحة. ومن جانب آخر تلك هى الحالة غالبًا فى البحث العلمى، حيث يتم اكتشاف الجوانب الأساسية ثم تكـــون التطبيقـــات دون شك هى تلك التى لم نتوقعها.

ومن ثم يقوم بالعلم العديد من الباحثين. فهم الذين يطورون ثـــم يـــصنعون، بصبر، وقطعة قطعة، و"على القياس" بشكل ما، بنياتهم الجزيئية الفائقة. ومن ناحية أخرى فإنه بطريقة العلم هذه بواسطة "التنظيم المسبق" هناك قلق من أن نرى كـــم هو سهل تجهيز آليات تكون من جانب آخر أكثر تعقيدًا، فى كل لحظة، ووضـــعها فى خلايانا. وما نرصده هو بالفعل "تنظـــيم ذاتـــى" للجزيئـــات. وتهتـــدى لبنـــات الجزيئات بنفسها، وهى مختلطة بدون نظام ظاهر، وتتعارف من جديد ثم تتجمـــع بالتدريج، لكى تقود بطريقة تلقائية لكنها منضبطة تمامًا، إلى تكوين الجزيئى الفائق فى النهاية.

فلنأخذ المثال البليغ جدا عن التنظيم الذاتى لفيروس سرنج[٦] التبغ. ولكى يتم بناؤه، يتجمع ٢١٣٠ بروتينًا بسيطًا لتكوين شكل حلزونى (الشكل ٧).

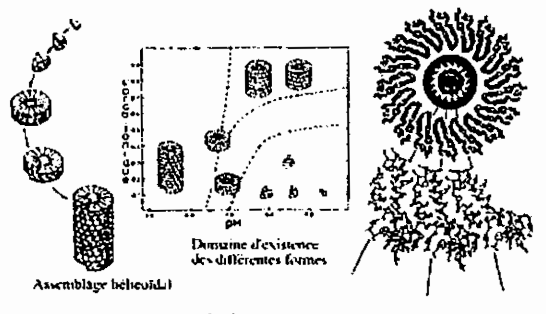
وفى هذه الحالة يكون فى داخل بروتين البدء فى المعلومات الضرورية بكاملها فيما يخص البنية المنظمة المطلوبة، وهناك تعارف جزيئى بالدقة التى تتيح النمو فـــى

---

(٦) سَرَنْج mosaique: داء فيروسى يصيب النباتات فينقط أوراقها بألوان مختلفة كالفسيفساء أخصها التبـــغ والخس والبطاطا. (المترجم)

المكان حتى الحصول على التكوين "المطلوب". ويتوقف تفاعل التجميع ولا يتعدى حده فى اللحظة المناسبة. ويتم الحصول على هذا التعطل هنا بتدخل حامض نووى يكون موجودًا فى داخل التكوين. وفى مجملها تكون عملية التنظيم الذاتى هذه بيولوجية وتمتد على هذا النحو خلال ثلاث مراحل: إعادة التعارف، والنمو والانتهاء.

ألا يمكننا أن نستوحى معرفة كيف نعمل تبعًا لما تكشف لنا الطبيعة عنه ونحاول أيضا أن نستخرج من الفوضى بنى حسب اختيارنا؟ هل فى قدرتنا أن نصوغ أيضا بعناية لبناتنا الجزيئية، رغم اختلاطها، بهدف أن نجعلها قادرة على التعارف والتجمع بنفسها؟ وهل يمكننا أن نخزن فى جزيئاتنا كل المعلومات، كل البرمجة الضرورية لبناء بنى جزيئية فائقة معقدة؟ بالطبع نعم، لأن إنتاجها فى المختبر سيكون طبيعيًا وبيولوجيًا، أو صناعيًا.



الشكل (٧)

فيروس سَرَنْج التبغ. من النوع ARN بكتلة مائعة molaire ١٠,٤٠، (٢)

توجد على هيئة جذع طوله ٣٠ مم وسمكه ١٦ مم. ويتكون من حلزون بسيط

مكون من ٢١٣٠ حافزًا متماثلاً (بروتين هول Hull).

وفى مركز الجذع يوجد جزئ حامض نووى على هيئة حلزون يحتوى على٦٣٩٠ نكليوتيد.

ويمثل الشكل على اليمين الإصابة بالفيروس. ونلاحظ ١٧ بروتين هول Hull تناظر دورة

حلزونية. وموضح فى الأسفل ٣ من هذه البروتينات بعد تكبيرها.

---

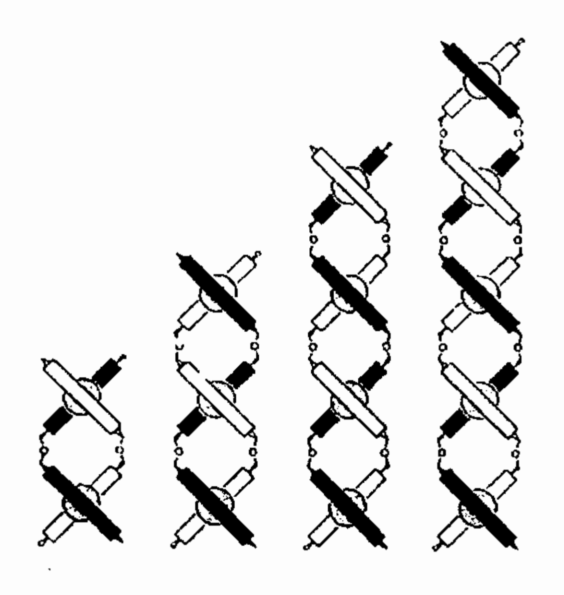
(٧) نكليوتيد nucleotide: أو نوويد، وهى موجودات أحادية القسيمة تبنى منها الأحماض النووية. (المترجم)

ويتعلق الأمر دائمًا بجزيئات تتكون من تشكيلات جزيئيـــة فائقـــة. وأريـــد ببساطة أن أوضح ذلك بمثالين، اخترتهما من بين أمثلة كثيرة متعددة أخرى.

يمكن على هذا النحو صناعة، أو فى الأغلب يمكن أن ندعها تُـــصنع، بنـــى حلزونية مزدوجة أو ثلاثية تصاحب أيونات معدنية مناسبة لجزيئات خطية من نوع ثنائى البيريدين الناقص oligobipyridine، الذى يحتوى من مجموعتين إلى خمس من البيبردين (الشكل ٨). ويكفى خلط هاتين الكسرتين، وإعادة إضافة "غراء"، التى قد تكون مثلاً أيونات النحاس I، من أجل الحصول، تلقائيًا، على تجمـــع حلزونـــى بكسرة مزدوجة (الشكل ٩). ومع تبديل أيونات النحاس I التـــى تـــرتبط بطريقـــة رباعية السطوح بأيونات النيكل II التى ترتبط بطريقة ثمانية الأسطح، نحصل هذه المرة على حلزون ثلاثى (الشكل ١٠).

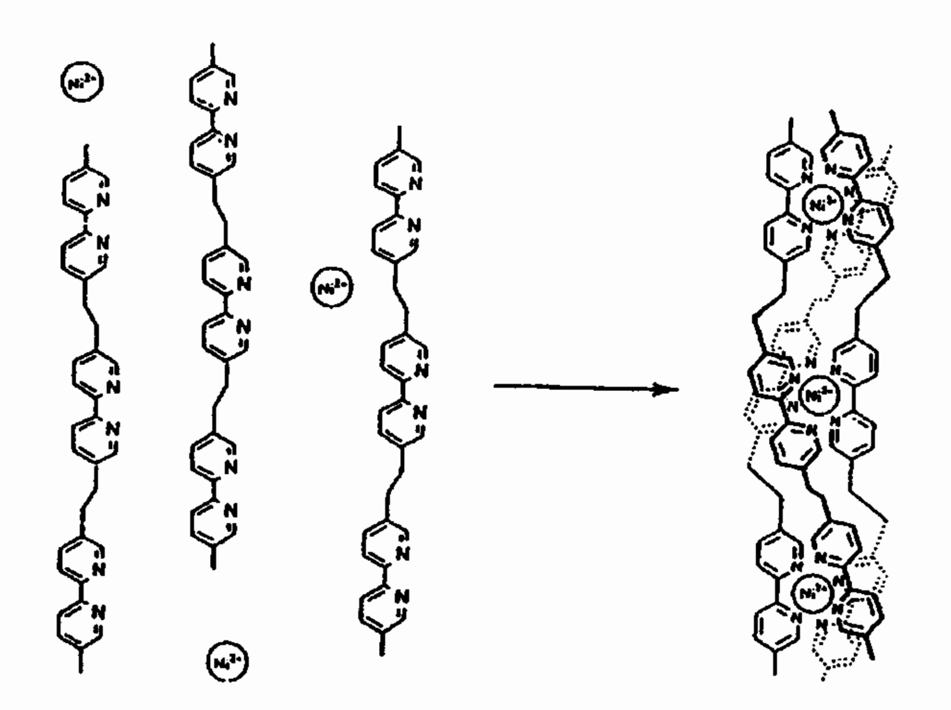
الشكل (٨)

سلاسل ثنائى البيريدين الناقص تحتوى على ما بين مجموعتين وخمس مجموعات من بيبردين يمكن أن تعطى حلزونيات.



الشكل (٩)
حلزونيات ذات كسرات مزدوجة تشكل من مجموعتين
إلى خمس مجموعات بيبردين.

كذلك من الممكن، بطريقة مماثلة، استخدام التنظيم الذاتى، لمساعدة جـزيئين من متعدد حلقات مستوى وثلاثة جزيئات خطية، لحث تجميع نـوع مـن القفـص الأسطوانى (الشكل ١١). وتقوم ستة أيونات نحاس I هنا (النقـاط الـسوداء فـى الشكل) بدور الإسمنت لربط اللبنات الجزيئية. ويمكن أيضا الإشارة إلى التشكيلات على هيئة "شباك" تستدعيها هندسات الدوائر الإلكترونية بالغة الصغر (الميكروية).



الشكل (١٠)

التنظيم الذاتى لحلزون ثلاثى من ثلاثة روابط غير تكافؤية،[٨]

يتكون كل منها من ثلاث مجموعات ٢، ٢ بيبردين وثلاثة أيونات نيكل Ni

باتجاهات ثمانية السطوح.

(٨) روابط غير تكافؤية ligands: جزئ صغير مثبت فى بروتين بروابط خاصة ليست تكافؤية الإســهام. (المترجم)

C_6H_5- et CH_3- non représentés

الشكل (١١)

تكوين قفص أسطوانى انطلاقًا من ثلاثة مركبات:

جزيئان متعددا الدوائر مكثفان مع ثلاثة مواقع للارتباطات

لتشكيل ذرتى أزوت.

وثلاثة جزيئات من ثنائى البيريدين الناقص oligobipyridine

مع موقعين للارتباط لتشكيل ذرتين أزوت.

وستة أيونات نحاس I ذات ترتيب رباعى الأسطح (بالنقاط السوداء)

وألا يجب أن نضيف أن هذه البنى بعيدة عن أن تكون فكرة خيالية، إنها مجرد هياكل قفصية الشكل، وحلزونيات يتم الحصول عليها، مثلها مثل الكثير من غيرها بالغ التعقد، فى المختبر. إنها بالطبع "منظورة" بواسطة الطرق الحديثة للتحليل، وخاصة بمنظار الطيف وبحيود الأشعة السينية، التى تتيح التأكد من بنيتها.

وليس الحصول على تلك البنى بالتنظيم الذاتى فى آخر الأمر بكل هذه الصعوبة. فإنها لا تحتاج إلى تجهيز معقد وتستطيع عملية تركيب اللبنات الجزيئية أن تنتظم ذاتيًا وبشكل أكثر بساطة بكثير من تركيب البنيان النهائى نفسه. وتتركز صعوبة هذا العمل فى النهاية فى الفكرة الأولية عن المركبات المستخدمة وفى

وضع استراتيجية، "للبرمجة" التى ستقود إلى النتيجة المرتقبة. ونلاحـــظ أيــضا أن عمليات التنظيم الذاتى، فى هذا المجال المفعم بالانطلاق والذى يحمل آمالا ضخمة، والذى يتمثل فى علوم النانو وتقنيات النانو، يمكنها أن تتيح خيــارًا قــادرًا بــشكل خاص على الصناعة والمعالجة: فبدلاً من القدرة على العمل دع الأمــور تعمــل! كذلك علينا أن نعرف أن لوحة ألوان إمكانياتنا تمتد، أكثر فأكثر، وأننا نوجد، فــى آخر الأمر، فى إهاب فنان، حيث الحد الوحيد هو الخيال، مما يوضح بجلاء كيــف أن الكيمياء هى علم هدفه ليس الاكتشاف فقط، ولكن أيضا – بلا شك – الابتكــار وبشكل خاص!.

وكذلك يشارك فى هذا النشاط البروميثيوسى (نسبة إلى بروميثيوس) للإنسان ما سبق أن لاحظه ليوناردو دافنشى Leonard de Vinci عندما كتب: "هنا حيــث تتوقف الطبيعة عن إنتاج أنواعها الخاصة، يبدأ الإنسان، باستخدام الأشياء الطبيعية وبمساعدة هذه الطبيعة نفسها، فى ابتكار أنواع لا متناهية...".

المراجع:

– LEHN (J.-M.), *Supramolecular Chemistry — Concepts and Perspectives*, VCH, 1995.

– *La chimie supramoléculaire : Concepts et perspectives*, traduit de l'anglais par A. Pousse, De Boeck Université, Bruxelles, 1997.

الكيمياء علم التحويلات[٩]

بقلم: نجوين ترونج آن

Nguyên Trong ANH

ترجمة: عزت عامر

يقال عن الكيمياء فى الصين إنها "علم التحويلات". ومنذ قرون أتاحت تقنيات الكيمياء بالفعل تحويل المادة إلى منتجات ذات أهمية بالغة. وبدون الكيمياء وبدون الكثير من المواد، ومن لبنات البناء، ومن الملاط، لكنا مازلنا نسكن فى الكهوف. وبدون الكثير من الكتب، لكنا قد عدنا إلى العصر الحجرى. لأن البرونز جاء من قبل عن طريق الكيمياء.

ومع أن الفنون الكيميائية تعتبر قديمة جدا إلا أن علم الكيمياء يعتبر حديث جدا. لقد ظهر فى نهاية القرن الثامن عشر، عندما لم يعد الإنسان قانعًا بالوصفات التجريبية وسعى إلى فهم ما يفعله، وهو ما طرح ثلاث مسائل.

أولاً يجب معرفة "الأشياء التى تتحول، ومن ثم تحديد "بنياتها"، أى تبيان طبيعة الذرات المؤلفة لها وطريقة الارتباط بينها. ثم يجب بعد ذلك فهم "كيف" تتحول هذه الأشياء. تلك هى "آليات التفاعل". وفى النهاية، يتعلق الأمر "باستخدام" هذه المعارف للقيام بعمليات "التخليق الاصطناعى synthese".

والأمثلة التالية توضح سمة علم الكيمياء، المسائل التى يدرسها تعتبر غالبًا صعبة جدا وحلولها سهلة إلى درجة تثير الدهشة.

---

(٩) نص المحاضرة رقم ٢٣٢ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ١٩ أغسطس ٢٠٠٠.

تخيل شرلوك هولمز، على أن يكون هولمز أعمى وليس لديه أدنى فكرة عن ما يكون أى قصر. وتخيل أننا قرأنا له كتبًا عـن حـساب لمهندسـين معمـاريين (أمبواز Amboise وبلوا Blois.... فى حاجة على التوالى إلى هـذا القـدر مـن الأحجار، والإردواز... إلخ)، وأن التزود بهذه الإفادة فقط يجعل هولمز يعيد إنشاء الأحداث قائلاً "بالضبط" إنها قصور اللـوار Loire. سـتقول دون شـك إن هـذا مستحيل، حتى بالنسبة لشارلوك هولمز... وقد تكون على خطأ.

ولأن كيميائيى القرن التاسع عشر كانوا قد نجحوا فى مأثرة مماثلة، فـإنهم كانوا عميانًا لأنهم لم يستطيعوا رؤية الجزيئات، ومن ثم ما هو أصـغر منهـا أى الذرات. وبالفعل فإننا نحو عام ١٨٠٠، كنا نجهل ماذا يكـون الجـزئ (القـصر الغامض). وكل ما كان فى استطاعة الكيميائيين أن يفعلوه هو إجـراء التفـاعلات بالطريقة:

أ + ب ⟵ ج + د

واختبار أ، وب، وج ود بالتحليل المئوى (ما يماثل سجلات الحساب)، ممـا يشير إلى أنه فى مثل هذا المركب، هناك مقدار محدد من المائـة مـن الكربـون، ومقدار محدد من المائة من الأكسجين.. إلخ. وكان ذلك يبدو كافيا بالنـسبة إلـيهم لاستنتاج أن مركبًا عضويًا هو مجموعة من "الجزيئات" المتماثلـة، التـى تـشكل "ذرات"، مثلما أن البيوت مصنوعة من لبنات البناء والقرميد... وأكثر من ذلك أنهم ابتكروا نظرية، "الكيمياء العضوية التركيبيـة chimie organique structurale"، التى أتاحت لهم الإثبات بالطريقة الكيميائية، أى فقط بعمل تفاعلات وتحليلات، كـم من الذرات موزعة فى الفراغ.

وبالنسبة للأمريكى ر. ب. فينمان R. P. Feynman، الحائز علـى جـائزة نوبل ١٩٦٥، فإن ذلك هو "أكثر التحريات الشرطية الوهمية التى لم تتحقق أبـدًا"،

وبالنسبة لسير ف. ج. هوبكنز Sir F. G. Hopkins، الحاصل على نوبل في الطب ١٩٢٩، كانت الكيمياء العضوية التركيبية "أحد أكبر مآثر العقل البشرى". ها همـا حكايتان عن هذا التحقيق الخيالى، الذى استمر ثلاثة أرباع قرن.

قانون الحجم وتفسير أفوجادرو له

فى ١٨٠٨ لاحـظ الفرنـسى ل. ج. جـاى – لوسـاك L. J. Lussac أن التفاعلات بين الغازات كانت بسيطة تمامًا:

١ حجم هيدروجين + ١ حجم كلور =
٢ حجم كلوريد الهيدروجين
٢ حجم هيدروجين + ١ حجم أكسجين =
٢ حجم بخار ماء
٣ حجم هيدروجين + ١ حجم أزوت =
٢ حجم نشادر

ذلك كان "قانون الأحجام" الشهير: تكـون أحجـام الغـازات التـى تتحـد والمنتجات التى تتكون بنسب بسيطة: ١ إلى ١، و١ إلى ٢، و٢ إلى ٣... هذا هـو التفسير الذى قدمه الإيطالى أ. أفوجادرو A. Avogadro (١٨١١): حيث إن الغاز يتحد بنسب بسيطة، فمن المنطقى التفكير بأن للمادة بنية غير متصلة، كـل جـسم عبارة عن تقارب "وحدات أولية" متماثلة. وهذه "الفرضية الذرية" تعتبر هنا طبيعية تمامًا.

وبالفعل إذا مزجنا لونًا أزرق بأصفر نحصل على تشكيلة خضراء متـصلة. وليس هناك أى سبب لاختيار أخضر أفضل من أخضر آخـر، أى أخـذ أصـفر وأزرق بنسب بسيطة. فالندرس الآن مجموعة عناصر غير متصلة بأن نأخذ مـثلاً فرقة باليه. فى كل لحظة، يكون عدد الراقـصين عـددًا كـاملاً، وكـذلك عـدد الراقصات.

وحيث إن الهيدروجين والكلور يتحدان حجمًا بحجم، يجب التسليم أيضا بأن:

- فى حجم ما، أيًا كان الغاز، يوجد دائمًا نفس العدد من "الوحدات الأولية" ولإدراك ضرورة "فرضية أفوجادرو"، نفترض حفلة راقصة يكون فيها عدد الرجال والنساء متساوٍ: لن يكون هناك من لا يشارك فى الرقص.

- لن نتوسع فى التشابه إلى أبعد من ذلك. إذا اتحدت وحدة هيدروجين مع وحدة كلور للحصول على وحدة كلوريد الهيدروجين ستكون النتيجة حينئذ من فرضية أفوجادرو أن حجمًا من الهيدروجين يتحد مع حجم من الكلور (الذى يكون مضبوطًا) للحصول على حجم من كلوريد الهيدروجين (وهو ما يخالف التجربة) (الشكل ١).



الشكل (١)

ولاستعادة النتائج الملحوظة، يجب التسليم بفرضيتين أخرتين:

- "الوحدات" (التى يطلق عليها من الآن فصاعدًا جزيئات) ليست المركبات النهائية للمادة لكنها متكونة من واحد أو أكثر من "جسيمات" (ذرات)، متماثلة أو غير متماثلة.

- كل ذرة ليس لها سوى عدد محدد من الروابط مع جيرانها. وهذا العدد يطلق عليه تكافؤها.[١٠]

---

(١٠) التكافؤ valence: مقدار ما لذرة عنصر معلوم له القدرة على الاتحاد بذرات عناصر أخرى. وهو أيضا عدد الإلكترونات التى تكتسبها ذرة ما أو تفقدها بتفاعلها مع ذرات أخرى فى جزئ ما. وهو أيضا عدد أزواج الإلكترونات التى تكون مشتركة بين ذرة ما وذرات أخرى فى جزئ. (المترجم)

يعود كل شيء حينئذ إلى النظام. نفترض أن جزيئات الهيدروجين والكلـــور كانت ثنائية الذرة diatomiques وأن ذرة هيدروجين تتحد مع ذرة كلـــور لينـــتج جزئ كلوريد هيدروجين. يوصف التفاعل بالرموز كما يلي:

hydrogène + chlore → chlorure d'hydrogène + chlorure d'hydrogène

1 volume — *1 volume* — *2 volumes*

الشكل (٢)

إذا كانت جزيئات الأكسجين والأزوت ثنائية الـــذرة وأن ذرات الأكـــسجين والأزوت تترابط على التتالى مع ذرتين أو ثلاث ذرات هيدروجين، تكون تفاعلات تكوّن الماء والنشادر (شكل ٣) كما يلي:

hydrogène + hydrogène + oxygène → eau + eau

2 volumes — *1 volume* — *2 volumes*

hydrogène + hydrogène + hydrogène + azote → ammoniac + ammoniac

3 volumes — *1 volume* — *2 volumes*

الشكل (٣)

أستُقبلت هذه النظرية بترحاب مُلطّف. وهى تحتوى على أربـــع فرضـــيات: البنية غير المتصلة للمادة (الفرضية الذرية)، وفرضية أفوجادرو، ووجود جزيئات وتكافؤات ثابتة للذرات. غير أن علماء الكيمياء، الوضعيين، قلما كان يطيب لهـــم الاعتماد على أشياء غير قابلة للملاحظة. وهكذا تم الاعتـــراض علـــى الفرضـــية الذرية بواسطة فرانسيه ج. ب. دوما Francais J. B. Dumas، وهــ. أ. ســـانت كلير ديفى H. E. Sainte - Claire Deville وم. بيرتيهيلو M. Berthelot. وفـــى ألمانيا، لم يتقبلها و. أوستفالد W. Ostwald إلا فى ١٩١١. ولسبب أكثر قوة تبـــرم

أهل العلم من التسليم دفعة واحدة بالفرضيات الأربع غير العاديـة القائمـة علـى معطيات تجريبية محدودة.

ولم تُقبل نظرية أفوجادرو إلا بعد خمسين سنة، عندما تم إثبات الفرضـيات الأربع تجريبيًا، كل منها بطرق مختلفة. وها هى طريقة لتحديد تكافؤات الذرات.

نحو ١٨٥٠ حاول البريطانى إ. فرانكلانـد E. Frankland تجهيـز أثيـل ethyle جذرى C_2H_5، بمعالجة يودور[11] الأثيل $I - C_2H_5$ بواسطة الزنك.

وكان من المتوقع أن يطلق تفاعل الزنك Zn مع اليودور I الأثيل:

$$Zn + 2 I - C_2H_5 I - Zn - I + 2 C_2h_5$$

(أى عدد اثنين أثيل جذرى)

ولقد حصل فى الواقع على التفاعل التالى:

$$Zn + 2 I - C_2H_5 I - Zn - I + C_2h_5 - C_2H_5$$

(جزئ من غاز البوتان butane)

كيف يمكن تفسير هذه النتيجة؟ بالطبع تولد الأثيل حيث إن اليـود فـى - I C_2H_5 مرتبط بالزنك. ولكن بما أنه لم يمكن عزله، فإن ذلك يعنى أنه متفاعل جـدا ويتحد على الفور. واقترانه بمجانس واحد لإعطاء بوتان يعنى أنه لا يقـوم سـوى بدور رابطة. ويقال إنه أحادى التكافؤ.

وكما أن الإيثان C_2H_5 - H ethane ينتج من اتحاد C_2H_5 وهيدروجين، فإن H هو أيضا أحادى التكافؤ. والصيغتان OH_2 وNH_3 (النشادرى) يشيران إلـى أن الأكسجين ثنائى التكافؤ والأزوت ثلاثى التكافؤ. وبالتدريج يمكن كذلك تحديد تكافؤ كل الذرات.

---

(١١) يودور iodure: ملح حمض يود هدريك ويستعمل فى معالجة عدد من الأمراض. (المترجم)

تحديد بنية مجهولة

من ناحية التخطيط، فإن تحديد بنية مركب مجهول "بالطريقة الكيميائية" يمكن القيام به بالطريقة التالية:

يعطى التحليل المئوى النسبة المئوية للعناصر المكونة له (الجزئ يحتوى على مقدار محدد فى المائة من الكربون، ومقدار فى المائة من الهيدروجين).

ويتم تحديد الكتلة الجزيئية بقياس كثافة البخار أو باستخدام قانون راؤولت Raoult (درجات حرارة الغليان والتجمد لمحلول ما تعتمد على الكمية والكتلة الجزيئية للمادة المذابة). واقتران التحليل المئوى مع الكتلة الجزيئية يعطى الصيغة الإجمالية (عدد الذرات لكل نوع فى الجزئ).

وتمت معرفة الوظائف الكيميائية الحالية بفضل تفاعلات خاصة. وعلى هذا النحو فإن كل الكحوليات الأولية لها الخواص التالية:

- لها هيدروجين قابل للتبادل مع الصوديوم Na.
- تتفاعل مع أحماض الكربوكسيليك للحصول على أملاح أستر asters.
- إذا تأكسدت، تفقد هيدروجينين وتعطى اثنين ألدهيد aldehydes (كحوليد).
- إذا عُولجت بحامض قوى، تُبعد جزئ ماء، مما يُوجد ارتباط مزدوج C = C.

وكل وظيفة كيميائية يناظرها مجموعة ذرات محددة. مثال لذلك، كل الكحوليات الأولية لها مجموعة $-CH_2OH$.

ويقترن الجزئ بقطع صغيرة بما فيه الكفاية لكى تجعل بنياتها قادرة على التكون بسهولة.

ولم يبق سوى تجميع قطع الصورة المنفصلة. وفى حالة الشك، يمكن تعزيز البنية المعنية بالتخليق الصناعى.

الكتابة الكيميائية

المتفق عليها هى التالية:

- يجب الالتزام بالتكافؤات: الهيدروجين له رابطة واحدة، والأكسجين اثنان، والأزوت ثلاث، والكربون أربع. ويمثل كل خط رابطة (الشكل ٤)

liaisons doubles
O
liaison simple

الشكل (٤)

- يتم تمثيل كل ذرة برمزها الكيميائى: O أكسجين، N أزوت.. ولكن ما يتصل مباشرة بالكربون C والهيدروجين H، لا يكون دائمًا صريحًا. ومن السهل وضع صيغة متقدمة كاملة انطلاقًا من الصيغة المبسطة (الشكل ٥):

O ≡ C=C–C=O ≡ H–C(H)=C(H)–C(H)=O

الشكل (٥)

وكان تحديد البنية بالطريقة الكيميائية لمركب يحتوى على ١٥ ذرة كربون يستهلك نحو مائة جرام من منتج مجهول ويحتاج من عالم الكيمياء الماهر من أربع إلى خمس سنوات من العمل. وحتى ستينيات القرن العشرين تقريبًا لم يكن ممكنًا فعل ما هو أفضل من ذلك. ومنذ ذلك الحين تقدمت الكيمياء التحليلية، وخاصة فى مجالين: فصل الأخلاط المعقدة وتحديد البنى بمناظير التحليل الطيفى. وكان لتلك التطورات نتائج عملية بالغة الأهمية.

وفى الواقع تكون المنتجات الطبيعية بشكل عام على هيئة أخـلاط. وهكـذا تحتوى خلاصة الوردة على نحو ٢٠٠ مركب. والفينيليثانول phenylethanol هو المكون الرئيسى، لكن المنتجات الثانوية هى التى تعطى دقائق الخلاصة. ويمكن أن تحتوى عصارة العنب على ٩٥ فى المائة من مكونات شاتوه مـارجو Chateau Margaux، لكن ليس من الضرورى أن تكون على علم بالخمر من أجل تمييزها! ومن ثم فإنه من الضرورى لمراقبى الجودة أن يكونوا قادرين على التحليل الكمـى للمنتجات المعدنية. وحدود كشف مركب معروف مقدارها حاليًا ١٠ فيمتـو جـرام (الفيمتو جرام يساوى جزءًا من مليون من مليار جرام). ويماثل تحديد تلوث مقداره ١٠ فيمتو جرام فى جرام واحد من الخليط، تعين موضع ١ ملليمتر على المـسافة بين الأرض والشمس.

ولا يستلزم تحديد بنية منتج مجهول بمنظار تحليل الطيف سوى بضع أجزاء من مليون من الجرام وبضعة أيام. وهذا أكثر من مكسب بسيط فى المنتج والوقت. وفى كل مرة تكسب فيها الكيمياء التحليلية بضع درجـات مـن المقـادير، تتفـتح نطاقات كان يتعذر بلوغها من قبل أمام الباحثين. لنفترض أننا نرغب فى فحـص أيضات[١٢] دواء ما. حيث إن الجرعة اليومية تكون بشكل عام أقل من جرام، فإذا كان التحليل يحتاج إلى ١٠٠ جرام من كل أيضة، تـصبح مثـل هـذه الدراسـة مستحيلة.

ولولا إمكانية تحليل الآثار لما كان هناك علم بيئـة. ومثـال لـذلك، تمنـع القوانين الأوروبية انبعاث أكثر من جزء من مليار من الجرام من الديوكسينات[١٣] لكل متر مكعب من الدخان. وكلمة ديوكسينات يجب استخدامها فى صيغة الجمـع. وفى الواقع هناك ما يقرب من أربعين، لها خواص فيزيائية وكيميائيـة متقاربـة،

---

(١٢) أيضة metabolite: مادة ناشئة عن الأيض، وهو التحول الغذائى (قوة التجدد والدثور والبناء والهـدم فى الكائن الحى). (المترجم)

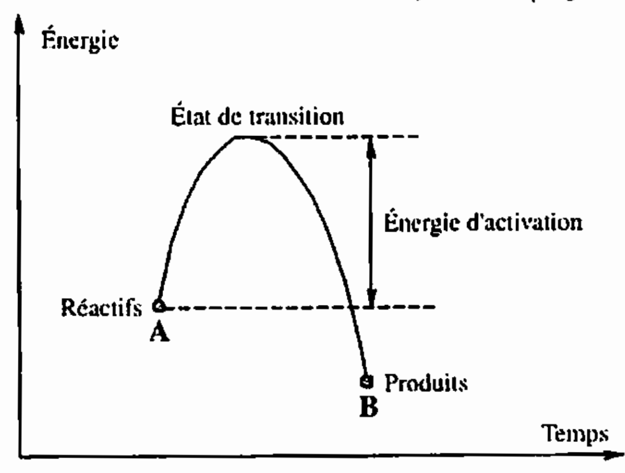
(١٣) ديوكسين dioxine: أى من الهيدروكربونات المختلفة الضارة، أو المسرطنة أو المشوهة والتى توجد كشوائب فى مبيدات الأعشاب المشتقة من النفط. (المترجم)

وليست كلها سامة. ومنذ بضع سنوات، كان هناك مصنع مهدد بالإغلاق. وأوضح تحليل دقيق أن المنتج، الذى تم تحديده بأنه سام، هو فى الحقيقة خليط من عدة ديوكسينات، وأغلبها ليس خطرًا. ومن ثم يكون المصنع مطابقًا للمقاييس، وكان زميلى فخورًا جدا بإنقاذ عدة مئات من العاملين.

وقد عرفنا كيف نحدد البنى، فلنعرض الآن المسألة الثانية.

آليات التفاعل

الرسم التالى يمثل مسارًا تفاعليًا (الشكل ٦). والنقطة أ تناظر منظومة البدء. وعندما يعمل التفاعل، تتغير بنى وطاقات المواد المتفاعلة. وبشكل عام تزداد طاقة المنظومة، وتتجاوز أقصى حد مناظر لحالة الانتقال، ثم تهبط نحو النقطة ب، التى تمثل المنتجات التى تم التوصل إليها.



الشكل (٦)

وخلال المسار التفاعلى فإن أ وب هما النقطتان الوحيدتان اللتان تناظران منظومات مستقرة، حيث يمكن للبنى أن تستقر. وتمثل النقاط الأخرى أنواعًا عابرة، تصل حدود استمرار وجودها إلى بيكو ثانية (جزء من مليون من مليار من

الثانية). ولا يمكن معرفة بنياتها بدقة. وفى هذه الحالة يجب أن تقطع آلية تفاعل التغيرات البنيوية لتسمح بانتقال المواد المتفاعلة إلى منتجات. وتبعًا لمزحة مشهورة، فإن عرض آلية قائمة على بنى مواد متفاعلة ومنتجات يماثل النظر لمشهد العرض والمشهد النهائى لقطعة مسرحية واكتشاف ما حدث فيما بينهما.

إنها ليست سوى مزحة. وفى الواقع يفحص عالم الكيمياء قطع لانهائية واضحة. فيغير المشهد الأول وتدله الطبيعة إلى ما سوف يكون عليه المشهد النهائى. ومن ثم يمكنه استنتاج المعلومات فى المشاهد الوسطية.

لنأخذ مثلاً تفاعل بُروم brome ذا الرابطة المزدوجة C = C (ألكين).(١٤) تعتبر الحركية أمرًا ثانويًا، والمهم أن التفاعل حدث عندما تفاعل جزئ بروم مع جزئ ألكين. فلنغير الآن المذيب. عند الانتقال من مذيب غير قطبى إلى مذيب قطبى (الذى يثبِّت الشحنات الكهربائية)، تزداد السرعة. وتعتمد سرعة التفاعل فى هذه الحالة على طاقة الحفز، الفرق فى الطاقة بين مرحلة الانتقال والمنظومة الأولية. وكلما كانت طاقة الحفز ضئيلة، كلما زادت السرعة. وحيث إن منظومة البدء كانت مكونة من الألكين والبروم، بدون شحنات كهربائية، فإن طاقتها يجب ألا تتغير مع المذيب. وإذا انخفضت طاقة الحفز، يمكن القول فى هذه الحالة إن شحنات قد ظهرت فى مرحلة الانتقال. فلنبدأ التفاعل بإضافة أيونات كلوريد Cl. بجانب المشتق ديبروم dibrome (بروم بذرتين فى الجزئ) (العادى) يظهر منتج حيث يكون أحد البرومات قد تبدل بكلور (الشكل ٧).

---

(١٤) ألكين alcene: كلمة مشتقة من الكحول، وهو هيدروكربور (من اتحاد الكربون مع الهيدروجين) يكون عمومًا لا دورى له صيغة CnH2n، ويطلق عليه أيضا كربور أثيلينى أو أوليفين olifine، وله رابطة مزدوجة. والأثيلين هو ألكين. (المترجم)

الشكل (٧)[١٥]

حيث إن الكلور موجود على هيئة أيون سالب، من الطبيعى التفكير فـى أن البروم المستبدل هو أيضا أيون بروم Br^-. وكون المنتج النهائى متعادلاً، فإن بقيـة الجزىء يجب بالتالى أن تكون أيونًا موجبًا. والآلية المحتملة (التى أثبتتها تجـارب أخرى) هى التالية. انتزع الألكين البروم Br^+ من جزئ البروم لتكوين أيون دائرى بطرد برومير Br^- bromure. وهاجم هذا الأخير كربونًا للأيون الموجب ليعطـى منتجًا نهائيًا ديبروميًا. بالطبع يمكن للأيون الموجب أن يتحد مع Cl^- ليـؤدى إلـى مشتق كلور (الشكل ٨).

الشكل (٨)

بلمسات متتابعة يمكن على هذا النحو الحصول على صورة دقيقـة مدهـشة عن آلية التفاعل. وفى تلك الآليات لم تتم معرفة المراحل الوسطى إلا بالاسـتدلال.

---

(١٥) الخط الثقيل يمثل رابطة متوجهة نحو الجهة الأمامية من الشكل والخط المنقط رابطة متوجهة إلى الخلف.

ومنذ نحو عشرين عامًا، كان من الممكن دراستها مباشرة. وبفضل أجهزة كمبيوتر قوية، أصبح في الإمكان حساب البنى والطاقات للمراحل الوسطية بواسطة الكيمياء الكمية. واعترفت بأهمية هذه الأعمال جائزة نوبل ١٩٩٨ التي مُنحت للإنجليزي ج. أ. بوبل J. A. Pople والأمريكي و. كون W. Cohn. ويمكن ملاحظة المراحل الوسطية أيضا بشكل تجريبي "بكيمياء الفمتو femtochimie". وتتكون الطريقة من إرسال دفعة لازر من بضع فمتوثانية (جزئ من مليون من المليار ثانية) في منظومة تفاعلية للتحفيز، ثم دفعة ثانية للتحليل. وعلى هذا النحو نحصل على "صورة" للمنظومة في حالة تغير. وحيث إن التفاعل الكيميائي يستمر بضعة آلاف فيمتوثانية، فإن هذه التقنية تتيح التوصل إلى التحولات الفورية. وحصل الأمريكي المصري زويل على جائزة نوبل ١٩٩٩ لمساهماته في هذا المجال. ومن المؤكد أنه سيأتي يوم يكون فيه كل المسار التفاعلي موصوفًا بالتفصيل. وبالنسبة للوقت الراهن تظل كيمياء الفيمتو محدودة بمنظومات ذات ٣ أو ٤ ذرات.

وفي الوقت الراهن يجب علينا إذن الاكتفاء بالآليات "الكلاسيكية"، التي يتم الحصول عليها بواسطة الاستدلال. وهي تتيح حتى الآن اختيار شروط تجريبية مناسبة وابتكار تفاعلات جديدة عند الضرورة. فلنأخذ مثلاً التفاعل:

حامض كربوكسيلي[١٦] + كحول ⇌ أستر[١٧] + ماء

هل يمكن أن نفعل ذلك في وسط متعادل؟ تشير آلية الأسترة[١٨] بأنه يتكون في البداية رابطة بين الأكسجين والكحول R`OH والكربون في $R - C - O_2H$. والسهم الخارج من O نحو C يعني أن إلكتروني الرابطة يتعلقان بالأكسجين. وبعد الرابطة يكونان متقاسمين بين C و O. وهكذا يكون على الأكسجين الذي تنازل عن إلكترون سالب أن يحصل على شحنة موجبة. وحيث إن الكربون لا يمكن أن يحيط

---

(١٦) كربوكسيلي carboxylique: حوامض محتوية على جذر الكربوكسيل. (المترجم)

(١٧) أستر ester: ملح عضوي. (المترجم)

(١٨) أسترة esterification: أو تأستر، أي تفاعل كيميائي يتم به تكون الملح العضوي. (المترجم)

به سوى ٨ إلكترونات محيطيًّا، فإن قدوم إلكترونات الكحول تقتنص إلكترونين كانا فى البداية متقاسمين بين C و O فى الحامض الكربوكسيلى (السهم الثانى فى الشكل). ويستقبل هذا الأكسجين إلكترونًا إضافيًا وتصبح له شحنة سالبة (الشكل ٩).

$$R-C(=O)-OH + R'-O-H \longrightarrow R-C(O^-)(OH)-O^+(H)-R'$$

الشكل (٩)

إنه يظهر إذن فى منتج قدوم الشحنات، وهذا يكلف طاقة. ولتوضيح ذلك، يطيب لفينمان Feynman أن يعطى المثال التالى. نأخذ ذرتى رمل قطر كل منهما ١ مم والمسافة بينهما ٣٠ متر ثم نؤينهما،[١٩] بحيث تكون إحداهما موجبة، والأخرى سالبة. تتجاذب هاتان الذرتان بواسطة قوة تساوى ٣ ملايين طن! وتبعًا لذلك ستكون الأسترة فى الوسط المتعادل صعبة.

هل الأمر أسهل فى وسط قاعدى؟ الهيدروجين الذى يلاحظ فى حساء من RCO_2H يكون حامضيًّا أكثر عشرة مليارات مرة من مثيله فى الكحول **R`OH**. والقاعدى، بكميات ضئيلة، سيتفاعل فقط مع $RCO_2H$ ويحوله إلى $RCO_2$، أيون سالب قليل الصلاحية فى تقبل الإلكترونات. وسيكون التفاعل أكثر صعوبة عنه فى وسط متعادل. والزيادة فى القاعدى ستكون أيضا أسوأ. وفى الواقع تكون كل البروتونات حينئذ منتزعة والمتفاعلات متحولة إلى $RCO_2$ و R`O. ويتم طرد شحنتين بنفس الإشارة، ولا يتفاعل نوعاهما.

وماذا عن الوسط الحمضى؟ إذا تمت إضافة حمض قوى، مصدر بروتون H^+، بإفراط، تكون كل الجزيئات بروتونية protonees فى $RCO_2H_2^+$،

---

(١٩) أيَّن ioniser: ولَّد أيونات. (المترجم)

و $R`OH_2^+$. ويُرَد هذان النوعان الموجبان ولا يتحدان. والآن إذا كـــان الحمــض بكميات طفيفة، لا تتواجد معًا عندئذ الجزيئات البروتونية وغير البروتونية. ويــتم تنشيط الحمض الكربوكسيلى البروتوني $RCO_2H_2^+$. وفى الواقع فإن البروتون يبتز إلكترونات من الأكسجين، الذى يعوض ما خسره بابتزاز إلكترونات من الكربــون المجاور. وسوف يكون لهذا الأخير شحنة موجبة وســوف يتقبــل بكــل ســرور إلكترونات الكحول. وسيكون التفاعل بين $RCO_2H_2^+$ (المنــشَّط) و$R`OH$ (غيــر ناشط). تلك هى أفضل حالة تم الالتقاء بها حتى الآن. وفى الوســط المتعــادل لا تكون المتفاعلات منشطة. وفى الوسط القاعدى أو فى وجود مزيد مــن الحمــض القوى، تكون الأنواع غير نشطة. والحالة تكون أفضل إلى حد ما من عدم وجــود تكوين للشحنة كما فى حالة التفاعل فى وسط متعادل (الشكل ١٠).

ليس من الضرورى إذن أبدًا حفظ ذلك عن ظهر قلب. وتشير الاســتنتاجات السابقة البسيطة جدا إلى أن الأسترة لا تمثل سوى وسط حمضى. ولكــن إذا كــان الحمض القوى زائدًا، لن يحدث التفاعل.

activé

$$R-C(=O^+-H)-O-H + R'-O-H \longrightarrow R-C(O)(OH)-O^+(H)R'$$

non désactivé

الشكل (١٠)

والآن كيف تتم أسترة RCO_2H إذا كـــان R لا يقــاوم الأحمـــاض؟ تــشير المقارنة بين الصيغتين RCO_2H و $RCO_2R`$ إلى أن الأسترة تستبدل **R`** بـــــ **H**. وليس تفاعل الاستبدال سهلاً تمامًا ومن الضرورى تنشيط RCO_2H أو المانح **R`**. وإضافة قاعدى نشط $RCO_2H$ على هيئة $RCO_2$. ويمكن أن يكون المانح يــودور R` - I (الشكل ١١).

$$RCO_2H \xrightarrow{\text{base}} RCO_2^- \quad R'-I \longrightarrow RCO_2R'$$

الشكل (١١)

نفترض الآن أن R لا يقاوم لا الأحماض ولا القواعد. كيف يمكـــن أســـترة RCO_2H؟ يكون التفاعل مع الكحول، الذى يقتضى حامضًا، غير متحقق. وحيث تم استبعاد استخدام قاعدى، يجب أن تتم الأسترة بالاستبدال عن طريق حفــز المـــانح `R، باستبدال I بالتالى بمجموعة أفــضل، مــثلاً بـــ diazo (زوج مـــن ذرات النيتروجين المترابطة) N`2.

عندما يكون RCO_2H والديازوميثان diazomethane موجــودين، يجعــل الحامض شريكه بروتونيًا، والتفاعل يكون صعبًا لأنه يُوجد أيونين. ومن ثم يكـــون التوازن مزاحًا بشدة جهة اليسار. والمرحلة التالية، التى تعادل هـــذين الأيـــونين، تكون بالعكس سهلة. ويضاف إلى ذلك أن الأزوت الغازى يخرج من الوسط ويعيد تلك المرحلة غير القابلة للانعكاس، إلا إذا أُزيح التوازن الأول باستمرار واكتملـــت الأسترة عند درجة حرارة المحيط خلال بضع دقائق (الشكل ١٢).

$$RCO_2H + \bar{C}H_2-\overset{+}{N}\equiv N \rightleftharpoons RCO_2^- \quad CH_3-\overset{+}{N}\equiv N \longrightarrow RCO_2CH_3 + N_2$$

الشكل (١٢)

إذا اشتملت التفاعلات على جزء مهم، فليس هذا كل الكيمياء. ويظل الهدف الأهم لعالم الكيمياء هو ابتكار منتجات لحل المشاكل النظريـــة أو التـــى تـــستجيب للاحتياج العملى. ومعرفة بنية الهدف وفهم الآلات التى تتيح تصور خطط منطقيـــة للتخليق الاصطناعى.

راوولفيا سيربنتينا rauwolfia serpentina هو نبات مستخدم فـــى الطـــب التقليدى فى الهند. وأتاحت الدراسة الكيميائية، التى أجريت عليه فى ١٩٥٥، عزل المادة الفعالة الرئيسية، وهى "ريسيربين reserpine" (الشكل ١٣)، التـــى تُـــستخدم حاليًا فى علاج ارتفاع الضغط، والاضطرابات العصبية والعقلية. كيف يتم تـــصنيع هذا المركب اصطناعيًّا؟

réserpine

الشكل (١٣)

ويوضح فحص صيغته وجود بنية معروفة جزئيًّا، هى الميثوكـــسيتريبتامين methoxytryptamine (الشكل ١٤):

الشكل (١٤)

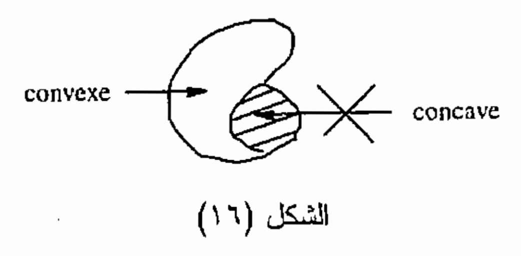
يبدو منطقيًّا بناء الجزء الذى يمثـــل الفـــضلة وجعلـــه يقتـــرن بعـــد ذلـــك بالميثوكسيتريبتامين. والهدف الأوسط I هو دائرة ذات ست حلقات تحمـــل خمـــسة بدائل مختلفة: ألدهيد aldehyde (كحوليد) CHO (يتيح بعد ذلك ربط الكربون بـــ NH_2 الخاص بالميثوكسيرتيبتامين)، ثم سلسلة CH_2 - CO_2H (تتيح وظيفة CO_2H بإعادة ربط السلسلة بـــ NH_2 وبالدائرة خماسية الزوايا). وظيفة أســـتر، ووظيفـــة أثير وأيضا وظيفة أستر (الشكل ١٥).

cible intermédiaire I

الشكل (١٥)

يمكن لكل بديل أن يكون له موضعان: (إلى الأمام أو إلى الخلف)، وهناك على الإجمال ٣٢ ترتيبًا مختلفًا: واحد منها فقط هو الصحيح. وكل الصعوبات يتم حلها عمليًا في ثلاث مراحل، باستخدام ثلاثة مبادئ تم تعلمها في السنوات الأولى لعلم الكيمياء:

- تفاعل ديلز – ألدير Diels - Alder.
- مركب "منحنى" يُفضل مهاجمته من الوجه المحدب، الأكثر سهولة (الشكل ١٦):



الشكل (١٦)

- إضافة XY إلى رابطة مزدوجة ليجعلها "ذات زوج من الذرات المتطابقة[٢٠] trans"، أي أن الألكين يكون مسطحًا، ويصل X عن طريق أحد الجوانب و Y من الجانب الآخر.

---

(٢٠) trans: ممتلك لزوج من الذرات المتطابقة على جهتين مختلفتين من ذرتين مرتبطتين برابطة مزدوجة وتُستعمل الكلمة لوصف مركب كيميائي ذي شكل هندسي متجازئ. (المترجم)

الشكل (١٧)

لماذا التخليق الاصطناعى؟

هناك الكثير من الأسباب للتخليق الاصطناعى لمركب ما ذى أصل طبيعى. أولها أن المصادر لا تكون كافية فى أغلب الأحيان. فإذا أردنا تحضير التاكسول taxol – وهو مضاد للسرطنة – انطلاقًا من الطقسوس،[٢١] لن تكفينا كل الأشجار الموجودة على الأرض. ويمكن للمنتج المركب صناعيًا أن تكون تكلفته أقل. وهذه هى حالة فيتامين سى C.

ويتيح التخليق الاصطناعى أيضا أن يجعل المنتج أكثر فعالية أو أكثر سهولة فى الاستعمال. كذلك فإن كل السيفالوسبورينات cephalosporines (مضادات حيوية) شبه مركبة اصطناعيًا، حيث المنتجات الطبيعية لا تكون بالفعالية الكافية. ويجب حقن البنسيلين ج penicilline G. ومع تغيير كيميائى بسيط يتحول إلى أمبيسيلين ampicilline، يمكن استخدامه عن طريق الفم. وباستبدال كبريت غاز الخردل l`yperite (غاز حربى) بأزوت يحمل مجموعة يوراسيل uracile، نحصل على دواء مضاد للأورام!

وأول مرحلة للتخليق الصناعى هى مرحلة ديلز ألدير Diels - Alder، وهو تفاعل تم اكتشافه فى الثلاثينيات بواسطة الألمانيين أ. ديلز O. Diels وك. ألدير K. Alder. واتضح أن هذا التفاعل نافع جدا حتى أنه جعلهما يُمنحان جائزة نوبل

---

(٢١) الطقسوس if: شجر للتزيين. (المترجم)

١٩٥٠. ويتدخل في مركبين: "ديين dien" وهو مجموعة من رابطتين مــزدوجتين (يشار إليهما بــ 2 - 1 و4 -3 في الشكل ١٨) ورابطة مزدوجــة 6 - 5. وهــذان المركبان يقتربان كل منهما من الآخر في مستويين متوازيين تقريبًــا. وبواســطة التسخين ينتج رابطتان بسيطتان 6 - 1 و5 - 4 مــع ضــياع مُــصاحب لــرابطتين مزدوجتين. ومن السهل أن نثبت بالصيغ المتطورة أن الرابطة المزدوجة المتبقيــة يجب أن تكون في 3 - 2. وتحدد الرابطتان 6 - 1 و5 - 4 مسطحًا. ومن الملاحــظ أن المركبين موجودان بالأحرى في نفس الجانب من هــذا المــستوى.[٢٢] وقــدم الأمريكيان ر. ب. وودوارد R. B. Woodward[٢٣] (الحاصل على جائزة نوبــل ١٩٦٥ لهذه التركيبــات الاصــطناعية) ور. هوفمــان R. Hoffmann (بولنــدى الأصل، وحصل على جائزة نوبل ١٩٨٠) تفسيرًا في ١٩٦٥ كميًا لهذه الخــواص (الشكل ١٨).

الشكل (١٨)

والحلقة أسفل A هي التي تسبق I. ونلاحظ أن ثلاث سلاسل جانبية (فــي 4 و5 و6) سبق وضعهم بشكل صحيح. وسوف تتيح إضافة على 3 - 2 إدخال البدائل المتبقية. وتكون الإضافة (زوج من الــذرات المتطابقــة trans)، منتجــان يمكــن ملاحظتهما (الشكل ١٩)

(٢٢) إذا كانت المادتان المتفاعلتان يتم تركيبهما على صورهما المرآوية، يكون هناك احتمــال مــساو لأن يكونا هما الاثنان على يمين المستوى 4 - 5 - 6-1 كما هو موضح في الشكل، أو أن يكونا معًــا علــى اليسار. ولوضوح العرض نقدم مركبًا واحدًا.

(٢٣) أحد أهم علماء الكيمياء الذين لم يسبق لهم مثيل، وهو أيضا ماهر في النظريــة مثــل مهارتــه فــي التخليق الاصطناعي.

الشكل (١٩)

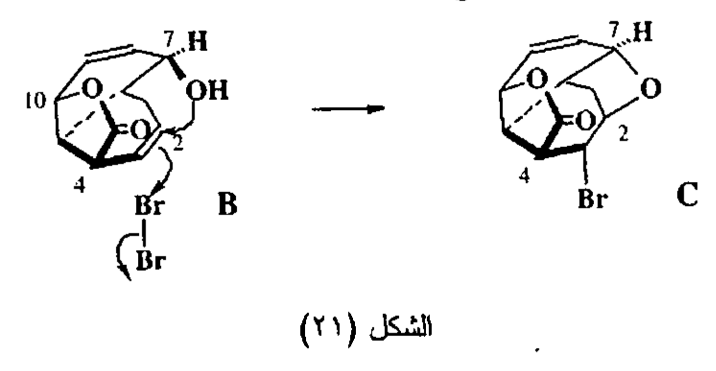
فى المنتج الجيد تكون السلسلتان 2 و7 فى نفس الجانب. واستخدام الأكسجين فى 7 كمادة متفاعلة X سيلزم هـذه النتيجـة. وعنـد الإقـلال مـن A، تـصل الهيدروجينات عن طريق الجانب المحدب. والأكسجين فـى 10، المـدفوع نحـو الأمام، يتفاعل مع الأستر فى 4 ليعطى حلقة خماسية الزوايا. ويأخذ الجزئ حينئـذ شكل "قفص" B حيث الأكسجين فى 7، الذى يعبر من الجانب المقعر، يوجد أعلـى الكربون 2 (الشكل ٢٠):

الشكل (٢٠)

وحينئذ تتم معالجة B بواسطة البروم brome. والإضافة على 3 - 2 تجعلـه (زوجًا من الذرات المتطابقة trans)، ويعطى التفاعل C. وفى مراحل ثلاث، فـإن سلاسل 5 الجانبية موضوعة بشكل صحيح.[٢٤] ويبقى تحويل C إلى I، ثم جعـل هذا الأخير قرينًا للميثوكسيتريبتامين. وليس هذا أكثر تعقيدًا بكثير، ولكـن شـرحه يطول كثيرًا وهذه الحاشية لا تفعل سوى إثبات النقطة الأساسية للعرض الـسابق،

(٢٤) يتكون أيضا، بكميات متساوية، صورة المنتج المرآوية لـ C (لاحظ I). ولا تسمح المتتالية الـسابقة باستبعاد "سوى" ٣٠ ترتيبًا من الـ ٣٢ ترتيبًا المحتملة. غير أنه من المستحيل أن نفعل أفـضل مـن ذلك، إذا كانت مواد التفاعل التى بدأنا بها يتم تركيبها على صورها. ويعود هذا التخليق الاصـطناعى للرزربين (قلويد لعلاج اضطرابات عقلية) reserpine (١٩٥٨) إلى وودوارد Woodward.

لمعرفة ما هو محتمل فى التخليق الاصطناعى لجزئ، ومدى تعقده، مع عدم استخدام سوى التفاعلات المعروفة. وليس ذلك متاحًا بالتأكيد لكل الناس، كما هو العدو "ميلاً" في ٤ دقائق، لكن ذلك ليس بعد مفخرة فوق قدرة البشر. لقد أصبحت التخوم الجديدة للكيمياء فى موضع آخر (الشكل ٢١).



الشكل (٢١)

تحديان أمام الكيمياء المعاصرة

وصف ج. م. لين J. M. Lehn بضع ميادين: كيمياء ما قبل الحيوى prebiotique، كيمياء الجزيئى الفائق supramoleculaire للمحاكاة البيولوجية biomimetique، [٢٥] وكيمياء الجزيئى الإلكترونية. وتقوم تلك الدراسات في الوقت الراهن على مجال أساسى. لكن عالم الكيمياء يمكنه أيضا أن يشارك فى معالجة تحديات نتائج عملية أكثر إلحاحًا.

---

(٢٥) الكيمياء هى مفتاح الحياة. والمعلومات الوراثية مُخزنة، يمكن قراءتها واستنساخها كيميائيًا. وتعطى رسائل كيميائية إشارة التكاثر والتمايز الخلوى، وتكوين الأعضاء، وتوقف النمو. والكيمياء هى التى تتيح للكائن الحى تخليق خلايا جديدة واستبدال الخلايا القديمة. وتأتى الطاقة الضرورية لعمليات التركيب هذه من التفاعل، ومن التأكسد البطيء للمواد الغذائية. وبشكل عام تصارع الكائنات "منعدمة الحماية" المعتدين عليها بأسلحة كيميائية. والاتصال الكيميائى شائع جدا وتستخدم للفيرومونات* pheromones بواسطة البكتيريا كما هو الأمر بالنسبة للإنسان. والاتصال الهرمونى معروف جيدًا. ويحتاج تكاثر الدافع العصبى إلى رسائل كيميائية، هى "المرسلات العصبية" neurotransmetteurs.

* الفيرومون: إفراز يفرزه الحيوان وخصوصًا الحشرات لهرمون يثير بنى جنسه. (المترجم)

وتبعًا لمنظمة الأمم المتحدة للأغذية والزراعة FAO فى عام ٢٠٠٠، فإن طفلاً من بين كل أربعة أطفال لا يأكل حتى يشبع. ويجب الحصول على أسمدة، ومبيدات حشرية... تتيح زيادة إنتاج المواد الغذائية مع الحد من زيادة التعداد السكانى. وليس ذلك مستحيلاً. وإذا قارنا د. د. ت. مبيد الحشرات والهوام DTT بالدلتامثرين deltamethrine الذى ظهر فى ١٩٨٢، فإن الجرعة العادية لكل هكتار (عشرة آلاف متر مربع) هى ٠,٥ إلى ٣ كجم من د. د. ت. و٠,٠١ كجم من دلتامثرين. فإذا تساوت الجرعات، فإن الأخير أقل سمية ثلاث مرات. ويبقى شهرًا فى التربة بينما يبقى د. د. تى. عشر سنوات.

وسوف يتيح لنا التقدم فى الكيمياء أيضا الاقتصاد فى الطاقة. فى الوقت الراهن، فإن نحو ٤٠ فى المائة من الطاقة المستهلكة فى الصناعة تستخدم فى عمليات الفصل والتنقية. وسوف تكون هذه العميات أقل تكلفة إذا اقتربت عائدات التفاعلات من ١٠٠ فى المائة. وليس ذلك غير قابل للتحقيق: فإن تخليقًا صناعيًا للكورتيزون cortisone يتم التوصل إليه فى نحو أربعين مرحلة، بعائد إجمالى يتجاوز ٩٠ فى المائة.

وتستهلك الكيمياء "الخفيفة" طاقة أقل. وتقليديًا تتم صناعة الزجاج عند درجة حرارة تقترب من ٢٠٠٠ درجة مئوية. ونعرف الآن كيف نجهزه عند درجات حرارة أقل من ١٠٠ درجة مئوية. وتتيح تلك التقنيات مزجها بجزيئات عضوية لتخليق مواد تثير الدهشة. إذا طعّمنا سطح زجاج بجزيئات تصد الماء، فإن واقيًا أماميًا للسيارة مصنوعًا من هذا الزجاج لن يحتفظ بالماء ويتيح الرؤية وقت سقوط المطر، حتى لو كانت مسّاحات الزجاج تعمل بشكل سيئ. وإذا طعّمنا بدلاً من ذلك بجزيئات ماصة للماء، فإنه على هذا الزجاج تنتشر القطرات لتكوين غشاء شفاف بدلاً من بخار غير شفاف. ويمكن كذلك لنافذة صغيرة خلفية أن تغنى عن التدفئة. وبعض سيارات سباق الرالى قد تم تجهيزها بواقيات زجاجية أمامية ونوافذ صغيرة من هذا النوع.

ونلاحظ دائمًا فى مجال السيارات أن عائد احتراق البنزين، يكون فى حدود ٣٠ فى المائة. وتتيح زيادة قدرها ٥ فى المائة فى هذا العائد اقتصاد ١٥ مليار دولار سنويًا، فى الولايات المتحدة فحسب.

عوضًا عن الخلاصة

جعل ج. ب. شاو G. B. Shaw أحد أشخاص إحدى مسرحياته الهزلية يقول ما يقترب من: " الشخص الوحيد العاقل الذى أعرفه هو الخياط الذى أتعامل معه: يأخذ مقاساتى كل مرة. أما الآخرون فيحكمون علىَّ للمرة الأخيرة".

أتمنى أن الكيمياء لا تلقى نفس المصير هى أيضا، بأن يتم الحكم عليها للمرة الأخيرة.

بين الفيزياء والكيمياء فرع معرفى هجين هو الكيمياء الكمية[٢٦]

بقلم جون - بول مالرييه

Jean - Paul MALRIEU

ترجمة: عزت عامر

تقع الكيمياء الكمية la chimie quantique بين علمين من أمهات العلوم، عند الملتقى بين الفيزياء، وبشكل أكثر خصوصية الفيزياء الجزيئية وفيزياء الجوامد، والكيمياء. وهي تمثل جزءًا مما يطلق عليه فى فرنسا الكيمياء - الفيزيائية، حيث خط الوصل يعنى وصل الموصوفين، بينما يميز الأنجلو ساكسون بين الفيزياء الكيميائية Chemical Physics والكيمياء الفيزيائية Physical Chemistry، تبعًا للتوازن بين المنافع والأدوات المستخدمة. ولا تمثل الكيمياء الكمية سوى جزء من الكيمياء - الفيزيائية. وهناك فى الواقع كيمياء - فيزيائية تهتم بالخواص العَيَانية macroscopiques للمادة، والتى تستنفر بشكل أساسى تفسيرات كلاسيكية. ويمكن النظر إلى الكيمياء الكمية كفرع معرفى يهتم فى المقام الأول بالخواص والمقاييس المجهرية microscopiques، الخاصة بالجزئ أو الذرة، والذى لا يمكن فهمه إلا بمساعدة الفيزياء الكمية. ويتعلق الأمر بخواص مجموعات الإلكترونات التى تتشارك فيها الذرات لتكوين الصروح الجزيئية، والخواص المميزة لحركة النوى داخل الجزئ.

وهناك بضعة أسئلة أولية تميز هذا المجال:

- كيف يمكن ببعض القوى جذب هذه الصروح طوال عمر طويل كما هو حال الجزيئات؟ وما الأنواع المختلفة للروابط الكيميائية بين الذرات، وما طبيعتها، ومتانتها؟

(٢٦)نص المحاضرة رقم ٢٣٣ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٠ أغسطس ٢٠٠٠.

- ما تجاوب الجزيئات مع الضوء، وعلى أية أطوال موجية تتجاوب، وما الذى يحدث عندما تمتص أحد الفوتونات أو الكثير من الفوتونات؟
- ما التفاعلات الموجودة بين الجزيئات، وما الحلول الوسط التى تمر بها، وما الصروح التى يمكن للتفاعلات أن تنشئها فى السوائل، والأغشية، والتنظيمات الجزيئية الفائقة التى حدثكم عنها ج. م. لين[٢٧] J. M. Lehn؟
- مم يتكون التفاعل الكيميائى الذى يبنى، عند لقاء A و B لتكوين جزئ AB، أو التقاء AB مع CD الذى يعطينا جزيئين AC وBD؟ بأية طريقة، وتحت أية شروط، يجب أن تمر بها المنظومة الفائقة لجزيئين يحدث تصادم بينهما أو يتقاربان لكى يتفاوضا حول التجميع الجديد، وينتج تفاعل كيميائى؟

ولكن الرد على هذه الأسئلة يمكن أن يحمله نوعان من الإجابات، بعضها نظرى، عن طريق الكيمياء الكمية، والآخر تجريبى، والذى يستنفر المصادر شديدة التنوع من علوم الطيف. والكيمياء الفيزيائية المجهرية التجريبية يصعب تمييزها عن الفيزياء الجزيئية، إلا إذا تم ذلك بتخوم تأخذ من التقليدى أكثر من البرهان. إنها تستدعى بدقة شديدة، بأن تزيد بلا توقف الحلول الزمنية أو الطاقية لاستجواباتها، أو بتنمية تلك الاستدعاءات، الموضوعات التى يعمل من خلالها علماء الكيمياء الكمية. ويستنفر ذلك هنا مسلمات ونظريات الفيزياء الكمية، التى ظهرت منذ عشرينيات القرن العشرين، لتفسير و/ أو التنبؤ، بطرق مجردة تمامًا أو رقمية، بخواص الجزيئات. ومن ثم فإن الكيمياء الكمية هى فرع معرفى نظرى، كما يمكن القول – وهو ما سأعود إليه – أكثر اتصافًا بالحساب منه بالنظرية.

تقطيع زمنى

فى البداية، هناك القليل من التاريخ حول المراحل التى مر بها هذا الفرع المعرفى، الذى سيتيح لنا إحاطة أفضل بالرهانات.

---

(٢٧) انظر المحاضرة رقم ٢٣١ لجامعة كل المعارف.

من أحد الجوانب كان هناك فى البداية مجموعة قوانين نظرية، تلك الخاصة بالميكانيكا الكمية، مع مفاهيمها الأساسية، ومعادلاتها الرئيسية، ونظرياتها، ومناهجها الصارمة ومقارباتها الاستدلالية، ومن جانب آخر يوجد إرث، مجموع المعلومات الأولية وتعبيرات سابقة حملتها الفيزياء الذرية، التى لعبت دورًا أساسيًا فى ميلاد الميكانيكا الكمية، والتى تتعلق بالكيانات التى انطلاقًا منها تُبنى الجزيئات.

لن أكتب معادلة، ولا حتى معادلة رئيسية تحدد الحالات المستقرة لمنظومة كمية، معادلة شرودنجر Schrodinger، وسوف أباشر العمل بالأمثال وبالاستعارات التجاوزية، التجاوزية قسرًا. فيجب أن أقول مثلاً إن الإلكترونات جسيمات مشحونة بشكل يتعذر تمييزه، ولكن لها خاصيةً، هى اللف الذاتى spin، الذى لا يمكنه أن يأخذ سوى قيمتين والذى يمكن النظر إليه على أنه جنس، إذا كان المطلوب تشابهًا سهلاً.

إرث الفيزياء الذرية

توصى الفيزياء الذرية أولا بتبسيط جيد، بأن تقول لنا، بواسطة بورن Born وأوبنهايمر Oppenheimer، إن النوى، والتى هى أيضا جسيمات كمية، إلى حد كبير لها كتلة أكثر ثقلاً من الإلكترونات، حتى إنه يمكن اعتبار تحركاتها بطيئة بالنسبة لإلكتروناتها، تلك التى تكيّف توزيعها على الفور مع موضع النوى. وذلك التقريب، الذى يوضع فيه ٩٩,٩ فى المائة من الأعمال، تنجم عنه المشاكل الإلكترونية والنووية ويتركنا مع مجموعة متجانسة من الإلكترونات، تنتقل فى مجال كهربائى جاذبى يؤثر عليها بواسطة النوى. وهناك درس آخر، كيفى، هو فكرة أن حالة المنظومة تنتج كنوع من التسوية بين ثلاثة مكونات للطاقة، الجاذبية النووية من جانب، وهى سالبة (توازنية)، وتكون كبيرة عندما تدور الإلكترونات قريبة جدا من النوى، ثم التنافر بين الإلكترونات، الجسيمات التى هى من نفس الشحنة، مما يجعلها تهرب، وأخيرًا الطاقة الحركية، موجبة، والتى لا تكون

ضعيفة إلا إذا تجولت الإلكترونات بهدوء في الفضاءات الشاسعة. ومن ثـم تقـوم التسوية بين قوى تحبس الإلكترونات قريبة من النوى وأخـرى تحـاول إبعادهـا، وتجعلها تتحرك على مدارات أكثر اتساعًا.

وقدمت الفيزياء الذرية فى وقت مبكـر تمامًـا رؤيـة تراتبيـة لمجموعـات إلكترونات داخل الذرة، وهى نموذج على هيئة طبقات وما تحت الطبقات. وتتميز تلك الطبقات بمستويات طاقة وبامتداد فراغي. وتوجد طبقات داخلية ذات طاقة شديدة جدا، حيث تدور الإلكترونات قريبة من النواة، وطبقات خارجية، يطلق عليهـا ذات تكـافؤ valence، وهى ذات طاقات أكثر ارتفاعًا حيث تدور الإلكترونات فيها أكثر بعدًا عـن النواة. وعندما لا تشارك الأولى فى الروابط الكيميائية، مكتفية بـشكل مـا بـالتكيف بواسطة تغيرات صغيرة، فإن الثانية هى التى تشارك فى بناء الروابط بين الذرات.

ويمكن النظر إلى الطبقات التحتية كما لو أنها تتميز بأشكال مـن مـدارات الإلكترونات، بتصور كلاسيكي. ولهذا يطلق عليها مـداريات orbitales. وسـوف أطلق عليها صناديق، تكون هنا ذرية. لنقل إن لها شكلاً وامتـدادًا مكانيًـا، وإنهـا تتصف بحجم النطاق حيث يميل الإلكترون الذى يحتلها إلـى التجـول، وتتـصف بشكلها، وهو نوع المدار الذى تتبناه. ومن ثم يكون لدينا صناديق كروية، مداريات من النوع "s"، صناديق متمددة تبعًا لمحـور ذى فلقتـين، بإشـارتين مختلفتـين، المداريات "p"... إلخ.

وباختصار كأنها حديقة حيوان صغيرة من الناحية الأساسية سوف تستعملها الكيمياء الكمية. وفى هذه البنية للنموذج الذرى، ستملأه الإلكترونات بلطف، اثنـين اثنين بلف متعارض، الطبقات والطبقات التحتية بالطاقات الأكثر انخفاضًا، خاضعة لمنطق الجدول الدورى لمندلييف Mendeleiv، الذى اقتُـرح مبكـرًا قبـل ذلـك بخمسين عامًا. ويعود أيضا للفيزياء الذرية فضل حصول الكيمياء الكمية على عدد معين من الأدوات، مثل التقريب الذى يطلق عليه "المجـال المتوسـط"، والـوعى بصعوبات مشكلة العنصر N، الذى سأتكلم عنه بشكل أكثر تفصيلاً.

لأول مرة، معرفة الرابطة الكيميائية
(الثلاثينيات)

منذ ثلاثينيات القرن العشرين، يبحث علماء الكم عن معرفة طبيعة الروابط الكيميائية المختلفة التى حاول الحصول عليها علماء الكيمياء منذ نحو مائة عام. ومن ثم يستخدمون، مقابل تبسيطات القوة، أدواتهم فى فهم الجزيئات الأكثر أولية، الجزئ H_2^+ ذو الإلكترون الواحد، والجزئ H_2 ذو الإلكترونين. والفكرة الرئيسية هى ما يلى: عندما لا يبقى فى صندوق الذرة الذى وصل إليه، وعندما يتحرك قريبًا من النواة الأخرى، يمكن لإلكترون أن يكتسب طاقة حركية بما أنه يدور فى حجم أكثر ضخامة بدون أن يفقد طاقة وضع، وترتبط الرابطة بلا تموضع الإلكترونات فى الروابط الكيميائية. ويحدث ذلك بدون مشكلة إذا كان هناك إلكترون فى الرابطة، وإذا كان اثنين، يجب أن يكونا من الجنس المعارض، حتى يمكن للإلكترون ذى اللف أعلى up الذى جلبته الذرة A أن يتجول فى الصندوق الذى جلبته الذرة B، الذى يحتله إلكترون ذى لف أسفل down والعكس بالعكس.

إذن لدينا نموذج، يقال له رابطة التكافؤ Valence - Bond، الذى يستعمل الصناديق الذرية لتكافؤ الذرات ويكوّن روابط بإلكترونين لهما لف معارض، متحركًا بين الصندوقين المجلوبين للرابطة بواسطة الذرتين الشريكتين.

ويتكون حل بديل من إلغاء الحدود بين صندوقين ذريين، لجعلهما صندوقًا واحدًا أكثر ضخامة على الرابطة وبوضع الإلكترونين فيه: هذا جزئ مدارى ذو رابطة. والإلكترونات التى لا تدخل فى أزواج الروابط تظل فى الصناديق الذرية، وقد تغير شكلها قليلاً بواسطة الروابط المشتبكة، التى يُطلق عليها "أزواج حرة" paires libres.

وإذا كانت الذرتان لهما طبيعة مختلفة، يمكن للإلكترونات بالأحرى أن تفضل الدوران، بل وفقط بالقرب من إحداها، وسيكون لدينا حينئذ رابطة أيونية جزئيًا، كما هو الأمر فى LiH، أو أيونية جدا مثل حال NaCl.

وفى كل الحالات، لقد خضع ميلاد النظرية الكمية منذ فترة منطقيًّا على الفور للعبة ليجو Lego جزيئية التى بواسطتها لعب علماء الكيمياء وفكروا منذ أكثر من نصف قرن، بكتابة صيغهم الكيميائية بواسطة الأحرف، والذرات، والأسهم، والروابط، التى من المفترض أن تحمل إلكترونين. وهذه المصالحة بين الكيمياء البناءة التى تُدرك حدسيًّا ونظرية مجردة وُلدت منذ وقت قصير، تعتبر حدثًا مهمًّا فى نظرية العلوم يستتر إلى درجة كبيرة فى التعليم.

وهناك مجال آخر للكيمياء هو الكيمياء المعدنية العضوية، organometallique التى استفادت بسرعة كبيرة منذ وقت قصير من الفيزياء الكمية. وسوف نفهم فى الواقع كيف تكون الأيونات المعدنية، المحاطة بروابط غير تساهمية للتكافؤ ligands جزيئية أو بأيونات غير معدنية، مضطربة فى هذه البيئة، وتكف الطبقات السفلية عن أن يكون لها نفس الطاقة، والأكثر انخفاضًا تقبل الإلكترونات الموجودة فى المعدن، وتكون طيفيتها مختلفة جدا عن تلك التى كانت بدون روابط غير تساهمية للتكافؤ. وهذه هى نظرية المجال البللورى، الذى تم استكماله بعد ذلك بأخذ اللاتموضع delocalisation فى الحسبان، وهو الذى يمكنه أن يتدخل بين مدارات وإلكترونات الروابط غير التساهمية للتكافؤ والمعدن، لتصبح نظرية لمجال الروابط غير تساهمية التكافؤ champ des ligands، وهى أداة تصورية أساسية لا يُحاط بها فى هذا المجال، وتتجاوز الأزواج الإلكترونية للروابط فى النموذج الكلاسيكى الحدسى.

وتشهد هذه الفترة أيضا استقرار فهم حركة النوى، وحركة الدوران والاهتزاز، لتؤدى إلى علوم طيف مميزة، غنية بالمعلومات.

والمساهمة الأخيرة لهذا العصر الرائد، هو فهم ما يحدث بين الجزيئات عندما تتقارب بدون أن يحدث لها تفاعل كيميائى: وفهم القوى التى تجذبها، وهى فى بعضها فى حدود كهربائية ساكنة (إلكتروستاتيك) لكن فى الأخرى تكون قوى توصف بأنها تفريق dispertion ولا يمكن فهمها إلا فى إطار النظرية الكمية، وقوى تدفعها، وهى أيضا ذات أصل كمى.

كذلك تم وضع تنظير كيفى، تفسيرى، تم تنظيمه فى صروح متنوعة ذات هيئة متباينة ويقدم مفاهيم جديدة، كانت جسيمة. وحتى ذلك الحين لم تكن هناك أجهزة كمبيوتر، حيث تتيح العقلنة تبسيطات قاسية لكنها استدلالية.

عصر اللاتموضع الإلكتروني
(ما بين عامى ١٩٤٥ و١٩٦٠)

لم يكن كل شىء ينسجم أيضا ببساطة مع لعبة الليجو Lego الصغيرة لعلماء الكيمياء. ولو كان الأمر قد استمر على هذا المنوال، لما كانت ميكانيكا الكم قد استخدمت إلا فى تأييد رؤية كلاسيكية ترتبط النوى تبعًا لها بزنبركات ذات أطوال وصلابة مختلفة. وكان على ميكانيكا جزيئية من النوع الكلاسيكى أن تتطور بعد سبعينيات القرن العشرين لدراسة تكوّنات الجزيئيات الكبيرة، وخاصة الجزيئات البيولوجية.

وأتاح نوعان من المسائل للمدخل الكمى دورًا فريدًا من نوعه. الأول يتعلق بالجزيئات حيث لا تكوّن بعض الإلكترونات أزواجًا يمكن تعيينها فى زوجى ذرات. تلك هى الهيدروكربورات hidrocarbures المتزاوجة: البولينات polynes والبنزين والنفتالين، ونظائرها التى لا تحصى. ولها جزيئات تكون فيها الذرات فى مسطح، تشتبك فيه روابط محلية إلى حد بعيد، حمّالة لإلكترونين، لكن جزء من هذه الإلكترنات ينتقل فى الصناديق الإلكترونية متجهًا عموديًا على مستوى الجزئ. والمسألة الثانية تتعلق باستجابة كل الجزيئات، حتى الأكثر توافقًا مع جزيئية الليجو Lego moleculaire، للضوء، وخاصة انبعاث إلكترونات (طيفية إلكترونية ضوئية spectroscopie photo - electronique). فإذا نظرنا مثلاً إلى عائلة الهيدروكربورات المشبعة، الميثان، والإيثان، والبروبان... إلخ، سنجد السلسلة الأكثر توافقًا مع لعبة الليجو الجزيئية، وتُعطى الطاقة إلى حد بعيد بواسطة إضافات لطاقات الروابط، بصفات الرابطة CC والرابطة CH على التوالى. ومع ذلك لا

نعرف شيئًا عن التغير المحتمل للتأين (الطاقة اللازمة لانتزاع إلكترون) في هـذه السلسلة، ولا اعتمادها على البنية الجزئية، وعلى تفريعاتها.

وها هنا يبدأ نفوذ اللاتموضع delocalisation الإلكتروني ويستقر تـصور بتعبيرات المدارايات الجزيئية غير المتموضعة، وهي معلومة جيدًا حاليًـا بالنـسبة لعلماء الكيمياء. وفي هذا التصور تحمل الذرات إلى البناء الجزيئـي إلكتروناتهـا التكافؤية والصناديق المناظرة، بدون اسـتباق الحكـم علـى الـشريك، وتتجـول الإلكترونات في مجموعة هذه الصناديق الذرية. ولكن خيرًا من النظر إلى نظريـة تكافؤ - رابط معممة، والتي تعتبر ممكنة لكنها لا تؤدي إلا إلى معالجـة رقميـة، صعبة وبلا معنى، سنبني انطلاقًا من صناديق ذرية صناديقًا أو مداريات جزيئيـة، تمتد في مجموعة هياكل جزيئية لكنها تلعب على الإشارات التي نؤثر بهـا علـى الصناديق الذرية في الصناديق الجزيئية. ومثال لذلك إذا نظرنا إلى مجموعة مـن أربع ذرات على استقامة يحمل كل منها إلكترونًا وصندوقًا، يمكن الحصول علـى أربعة ترتيبات محددة تمامًا (يقال لها متعامدة)، وتكون على التتـالي ++++، ++- -، + - - + و+ - + -. فإذا حسبنا طاقة إلكترون موضوع فـي إحـدى هـذه المداريات الجزيئية سوف نجد أنها تعتمد بشدة على هذا التمثيل بالإشارات: كلمـا كان هناك المزيد من التغير في الإشارات، كلما ارتفعت الطاقة. لـذلك إذا أردنـا التأثير في المجموعة الإلكترونية في هذه المجموعة من المداريات الجزيئية تـضع إلكترونين، وتكون دائمًا في لف متعارض، في مداريات ذات الطاقة الأقل. ويكون لدينا على هذا النحو رؤية للمجموعة الإلكترونية التي تبعًا لها تكون الإلكترونات لا تزال على هيئة أزواج لكنها تحتل أنواعًا من الأماكن تمتد في مجموعـة الأمـاكن الجزيئية، على مستوى مختلف من الطاقة، وتكشف عـن المزيـد والمزيـد مـن التغيرات في الإشارات، في الفواصل إذا ظللنا في ذلك التـصور الثابـت، عنـدما نصعد في الطبقات (من ناحية الطاقة). وهكذا عندما نضع كل الإلكترونـات فـي الطبقات الأكثر انخفاضًا، تبقى هناك أماكن خالية ذات طاقة مرتفعة. وتأيين جزئ ينتزع إلكترونًا من المستويات المحتلة، وهو ما يساوي طاقة معطاة، مكمَّاة، تميـز

هذا المستوى، ويحفز جزيئًا على إرسال إلكترون من مستوى محتل إلى مـــستوى خال، وهو يتضمن من جديد طاقة محددة.

وفى الواقع لا تتعامل اللعبة التى تبعًا لها يتم ترتيب المداريات الذرية لبنـــاء مداريات جزيئية، إلا بالإشارات، فهى أكثر ارتباطًا بالكم، ومنظمة بواسطة الرمـــز الكمى المصاحب للطاقة، العائد إلى هاملتون l`hamiltonien. وأتاح شكل مبـــسط تمامًا منه وهو طوبولوجي بالفعـــل (هـــاملتونيونى هوكيـــل l`Hamiltonien de Huckel) فى الوقت نفسه حسابات رقمية على حاسبات رقمية عصرية، وتحليلات جبرية باهرة جدا. وضاعف هذا النموذج، الشائع أيضا فى فيزياء الجوامـــد، مـــن النجاحات بين عامى ١٩٤٥ و١٩٦٠. ومع ذلك كان للكيمياء الكمية شيداؤها فـــى الاتحاد السوفييتى تحت إمرة ستالين، حيث تم إرسال علمـــاء كيميـــاء الكـــم إلـــى الجولاج Goulag كدعاة لأيديولوجية برجوازية لا حتمية. فإذا فكرنا فيما أعطـــاه علماء الفيزياء السوفييت فى نفس تلك الفترة وحتى ما كان فى اســـتطاعتهم فعلـــه، بمساعدة نفس الأدوات التصورية، أسلحة الانشطار والاندماج النوويين، لقـــدّرنا أن الكيمياء الكمية لم تصبح بعد تقنية تنبؤية إلى حد بعيد.

عصر الحساب (١٩٦٠ - ١٩٧٥)

سوف تتيح المعلوماتية لهذا الفرع العلمى أن يتم معاملته بشكل جاد، ســـوف تعيد الأشكال الأكثر بساطة للهاميلتونية وتعبيرها المضبوط. وبالتأكيد لن نحـــصل على حلول مضبوطة للمعادلة الرئيسية، وسوف نعمل فى إطار تقريبين:

- يشمل الأول، الذى تم تجاوزه أيضا فى الوقت الراهن فيما عـــدا حـــالات استثنائية، العمل فى مكان اتجاهى محدود، أى بعدد محدود من المـــساكن الذريـــة. لكننا سنأخذ عددًا أكبر فأكبر، لكى نحصل على المزيد من درجـــات الحريـــة فـــى التوزيع المكانى وفى شكل المداريات الجزيئية.

- يشمل الثانى، مؤقتًا، ملء المـــستويات الإلكترونيـــة الأكثـــر انخفاضـــا

بإلكترونين والتقليل من الطاقة الكلية. وفى هذا التقريب تتحرك الإلكترونات فى مجال متوسط، متكون بواسطة النوى والإلكترونات الأخرى.

وقلبت تلك المرحلة وجه هذا الفرع العلمى، وقلبت ممارسته وأثره. وكانت هناك رغبة فى نقل الخبرة بطريقة كمية، والإقلال من تقنية الانفجار، وحساب وتخزين وتدبير عشرات الآلاف من التكاملات، والتفكير الاستراتيجى الاحتسابى computationnelle، وتشذيب الذاكرة، وسرعة الحسابات الخوارزمية algorithms. ومن جانب ظهر الاختصاص، بشكل تقنى مقبول، قريب من المعلوماتية حيث تجب معرفة أدوات فى حالة تطور سريع. وأصبح هذا الفرع المعرفى رقميًا وفقد فى الروعة ما كسبه فى الدقة. لكنه حافظ بحماس على السباق نحو تنبؤية كمية.

عصر الصرامة: تحدى الارتباط الإلكترونى (١٩٧٥ - ١٩٩٠)

لحسن حظ عقل هذا الفرع المعرفى، أنه من المستحيل أن يكون البحث عن حل مضبوط للمعادلة الرئيسية نقيصة أكثر صعوبة. والتقريب المشتمل على وضع أزواج الإلكترونات فى مداريات تفاضلية هو أمر غير متقن. وفى الحقيقة، أو فى الحل المضبوط، لا تتحرك الإلكترونات فى مجال متوسط ثابت. فلو كان على إلكترونين أن يلتقى كل منهما بالآخر، فإنهما سوف يحولان مساريهما ولن يعودا مستقلين. ويطلق على مشكلة الارتباط بين الإلكترونات هذه "مشكلة عند جسم N الكمى)، وتتطلب فى أفرع علمية مختلفة جهودًا إدراكية ومنهجية ضخمة. وعلينا أن نعرف أنه فى هذا النطاق نجد الكيمياء الكمية أكثر اقترابًا من الفيزياء النووية منها إلى فيزياء الجوامد، التى تتعامل هى أيضا مع ذلك مع إلكترونات فى مجال النوى.

ولمشكلة الارتباط هذه جانبين، شكلى وفيزيائى. ويتعلق الجانب الشكلى بأن يكون توزيع الإلكترونات فى المساكن فى ترتيبها، بأن تكون محلية (ذريًا) أو

منتشرة فى الفضاء الجزيئى. والعدد المحتمل لهذا التوزيع لـــــ n إلكتـــرون فـــى مساكن p، حتى تحت إجبار ألا يوضع أكثر من إلكترونين فى كل مسكن، هو عدد كبير وبعض التوزيعات تكون غير مفضلة إلى حد بعيد. وعُرف شكليون فى غاية الظرف، يجربون ترتيبًا صارمًا شكليًا وسلوكيًا. ويمكن تـــصدير بعـــض الأدوات، بشكل عام جدا، من الكيمياء الكمية إلى مجالات أخرى.

ويتعلق الجانب الفيزيائى بتجنب evitement الإلكترونات فى المكان. فـــإذا كان لإلكترونين نفس اللف، فإن احتمال أن نجدهما فى نفس النقطـــة مـــن المكـــان منعدم، وهذا نوع آخر من الخوف من التجانس homophobie الذى يعمل فى بنية أزواج الإلكترونات، والذى يبدو للعيان بواسطة "ثقـــب فيرمـــى trou de Fermi". وتدبر الإلكترونات ذات اللف المتعارض مواقعًا أفضل، ويمكن أن نجد اثنين فـــى نفس الجهة، لكنها تفضل المحافظة على مسافة ما، بسبب دفعها الإلكتروســـتاتيكى، وتلك خاصية محيرة جدا لوظيفة الموجة تمامًا مثل أن تبدو فى كـــل نقطـــة تلـــك المفردة singularite التى يطلق عليها "ثقب كولومـــب trou de Coulomb". مـــن المستحيل أن نضع فى اعتبارنا هذه الخاصية فى كل نقاط المكان الفيزيائى بمـــساعدة مجموعة محدودة من المداريات. ولحسن الحظ فإن ظاهرة التجنب هـــذه ذات القـــوة الوجيزة أو التى تحدث فى اللحظة الأخيرة ليس لها تأثيرات طاقيـــة مهمـــة وتتـــأثر الحسابات برقم محدود من المداريات، فمثلاً عندما يكون لدينا عشر مـــداريات، تـــم اختيارها بشكل صائب، بواسطة إلكترون، فإنها تعطى طاقات صحيحة بشكل كـــاف بالنسبة للدقة المرغوبة بواسطة علماء الكيميـــاء. إلا أن الاختـــصاصيين فـــى علـــم المناهج مضطرون إلى حساب تأثير ثقب كولومب، بنجاح مقنع.

عصر الفاعلية المحاكاتية (١٩٩٠ -؟)

وبناء عليه فإن علماء الكيمياء فى الوقت الراهن قادرون على أن يحـــسبوا بطريقة دقيقة جدا طاقات وهندسات الجزيئات لأقل من عـــشر ذرات فـــى حالتهـــا

الأساسية، بدون تقديم معلومات أخرى تجريبية مثل الشكل التحليلى المستخدم فى المداريات الذرية. وهو ما يطلق عليه "من البداية ab initio"، كنقيض للتبسيطات شبه التجريبية المستخدمة سابقًا. وهذا النهج مفند فى الوقت الحالى بسبب تقديم بديل أقل تكلفة بكثير.

وتحتاج حسابات "من البداية" فى الواقع إلى وقت للحساب يزداد كما لو كان أسًا للعدد N للإلكترونات: يرفع هذا العدد للقوة الرابعة N^4 فى طريقة المجال المتوسط، وإلى القوة السادسة N^6 أو السابعة N^7 إذا كنا نعالج الارتباط بين الإلكترونات. وكانت دراسة الجزيئات الكبيرة التى تحظى باهتمام التجريبيين، وعلماء الكيمياء البيولوجية، ومبتكرى مواد جديدة، والاختصاصيين فى التحفيز، تبدو مستحيلة. وهذه الكلفة الباهظة تهتم من حيث المبدأ بما تعالجه وظيفة الموجة فى الإحداثيات الثلاثة لإلكترونات N وتعمل فى مكان ذى أبعاد 3N.

غير أن نظرية، تعود إلى هوهنبرج Hohenberg وكون Kohn، تثبت أنه يجب وجود تناظر ثنائى التقابل biunivoque correspondance بين الكثافة الإلكترونية فى المكان الفيزيائى، ذى الأبعاد الثلاثة، ووظيفة الموجة، ومن ثم الطاقة. تناظر لا نجده إلا فى الحالة المثالية لغاز متجانس من الإلكترونات. من هنا الحلم بشكلية تعمل مع الكثافة الإلكترونية الوحيدة. ننتقل إذن لحالة مثالية وبعض التعقيدات المخصصة للأخذ فى الاعتبار عدم تجانس الكثافة، وتم تقديم "نظرية وظيفية الكثافة theorie de la fonctinnnelle de la densite" أو DFT، وهى أكثر اقتصادًا بكثير من الأساليب المبدأية التى وصفتها سابقًا. والوظائفيات fonctionelles المستخدمة حاليًا لها أشكال معقدة، وتقدم بارامترات كثيرة، وتعطى نتائج تضارع تلك الخاصة بأفضل الحسابات "من البداية ab initio"، بأقل تكلفة ممكنة. وبالتأكيد لا تنتج القيم المعطاة لتلك البارامترات عن المبادئ، ولقد تم ضبطها بالتجارب والأخطاء على مجموعة تجارب رقمية. حتى أن طريقة DFT تعتبر أيضا فى الوقت الراهن طريقة شبه تجريبية. وحتى أنا أؤكد أنه يمكن كحد أقصى إعطاؤها نظام شبكة الخلايا العصبية، أى آلة قابلة للتعلم. ولو أن شبكة

خلايا عصبية، مجدولة على هيئة أسلاك انطلاقًا من مجموعة تجارب، لا تعطـــى استجابة كافية فى حالة جديدة، يجب مزج هذه الحالة بمجموعة تدريب ومراجعـــة الأسلاك المجدولة. وقليلون هم المتمرسون بطريقة DFT فى الوقت الراهن، مع أن باحثين فى النظريات الأساسية يتجهون أيضا إلى إنتاج وظائفيات عميقة من الناحية الشكلية. والمحصول النوعى لنتائج العائد/ التكلفة للحسابات هو فى كـــل الحـــالات مثير جدا ويبدد الوساوس المحتملة لأغلبية المستخدمين. وليس هناك ما يدعو إلـــى قول الكلمة الأخيرة إذا كان المطلوب إجابة محتملة جدا على سؤال دقيق يخـــتص بمنظومة جزيئية.

بضع نجاحات باهرة بانضباط صارم

إن نجاحات الكيمياء الكمية ذات أنواع مختلفة.

فهى تتيح أولاً تمثيلاً كيفيًا للجماعة الإلكترونية. وهى فى الوقت نفسه بحث له تحيزاته، وهى أنثروبولوجيا وعلم اجتماع. وتحكى عن الجاذبيات والإقصاءات، وتصنف الروابط، وطبيعتهـــا، وتفكـــر فـــى التراتبيـــات الطاقيـــة، والتقـــسيمات، والمشاركات، وقوانين القرابة والتسويات الاقتصادية. وأصبحت نظرية المـــداريات الجزيئية تعليمًا وافرًا لعلماء الكيمياء، تلك التى تطلبت منهم جهودًا مشكورة، حيث لم تدخل بسهولة فى النموذج الكمى. وفى هذه المرحلة وبمعيار أنها قابلة للمعالجة التحليلية، أو يدويًا، فإن الكيمياء الكمية تكون أحيانًا أخلاقية إلى حد كبير. وبـــشكل خاص عندما تعالج إلكترونات لا متموضعة لجزيئات متزاوجة، يتأتى الطرد فـــى هذا النطاق دون شك بصياغة قواعد تحكم التجـــسيم النـــوعى stereo - specifite للتفاعلات الكهربائية الدورية electrocycliques، وهى مشكلة يمكـــن صـــياغتها هكذا: عندما ينغلق جزئ على هيئة شريط بواسطة طرفيه، فهل ينغلق على هيئـــة أسطوانة أو مثل شريط موبياس Moebius؟ وجعلت هذه القواعد التى تم إخضاعها للمنطق بواســـطة برهـــان بـــسيط وودوارد Woodward وهوفمـــان Hoffmann

يستحقان جائزة نوبل. وما يمكن الأسف له مقابل ذلك هــو أن مــدخل المــداريات الجزيئية اللامتوضعة يكون أيضا مسيطرًا فى التعليم وأن المداخل البديلة بــصياغة مداريات الروابط، المعادلة تمامًا لتلك السابقة لوصف الحالة الأساســية لمجمــوع الجزيئات تقريبًا، قد لا تكون تعليمية، فى حين أنها تثبت التصور الحدســى الــذى يستخدمه علماء الكيمياء فى الحياة اليومية.

وهناك استخدام كمى مثير يتعلق بالصروح المغناطيسية، حيث تبقى بــضعة إلكترونات وحيدة فى صندوقها، وتتمثــل المــشكلة فــى معرفــة مــا إذا كانــت الإلكترونات العازبة تفضل أن يكون لها نفس الجنس أو أجناس مناقــضة. وهنــا تكون التأثيرات الكمية حاسمة. وأريد أن أحيى هنا الطريقة التى يعرف بها علمــاء كيمياء مبدعون للغاية، مثل أوليفييه كان Olivier Kahn، الذى توفى قبــل الأوان هذا الشتاء، أو ميشيل فيرداجويه Verdaguer Michel، كيف يــستنفرون رؤيــة نظرية بسيطة فى تخطيطهم لمركبات جديدة ذات خواص مهمة. وها هنــا يفتــرى القدر الذى يفرق بين التجريبيين والنظريين. وبالنسبة للنظريين "الصرف"، مثلــى، فإن مقابلة هؤلاء الرفاق ومسائلهم الرائعة التى يعرضونها علينــا، تمثــل ســعادة منشطة.

وأشباه الكمى هى المعلومات التى تتعلق بعلم الطيــف. وتماثُــل الحــالات المتضمنة فى عمليات الإثارة، وشدة امتصاصات الفوتونــات، والنــسق الطــاقى لحالات الجزئ، وطبائعها التى تكون أحيانًا مختلفة من الناحية الكمية، تعتبر كــذلك أسئلة تتطلب الإجابة عنها سلطة المفاهيم الكمية والتعامل مع وظائف الموجة.

بعد ذلك تأتى النجاحات الكمية، والدقة المدهشة للحسابات الأكثر صــرامة، والمؤثرة على الجزيئيات ذات المقياس المتوسط، والتى يمكن إثباتها بالمطابقة مــع المعلومات التجريبية. وتعتبر هندسات الاتزان، وأطوال الروابط، الضرورية عنــد قطع الروابط، منتجات، سوى استثناءات نادرة، بنسبة تقترب من مائة فى المائــة. وخلال زمن طويل لم يكن علماء النظريات يضعون لأنفسهم أهدافًا سوى الإنتــاج،

الجيد أيضا بقدر الإمكان، لنتائج التجربة، وفى عصر تعرضوا خلاله للنقد والسخرية، عندما أنهكوا أنفسهم مثلاً، مع سنة أو سنتين من التأخير، فى إنتاج توجه العزم مزدوج القطب للجزئ البائس CO، الذى كان التجريبيون يراجعونه دوريًا. وقد اكتمل هذا العصر إلى حد بعيد. فعلماء الكيمياء الكمية يثبتون ويتنبأون. فهى تتيح تعيين المركبات غير المستقرة، الموجودة فى فضاء ما بين النجوم، المسئولة عن الخطوط فى الطيفية الهرتزية hertzienne، والتى تظهر فى وفرة من الخطوط. وتلك المركبات توجد هناك بسبب الفراغ الهائل الذى يهيمن، والذى يجعل من النادر جدا حدوث تصادمات قد تحطمها، كما يحدث لها فى المختبرات. ونستطيع تعيين بنى مراوغة، وحساب الحالات الوسطية غير المستقرة إلى حد بعيد للتفاعلات الكيميائية. ويناظر كل مركب مستقر بنية هيكل جزيئى، وبدون استبعاد، يحرك النواة، مما يكلف طاقة. وتصور الاتزان يكون مثل بحيرة بين الجبال. والانتقال من تصور للاتزان إلى تصور آخر، ومن ثم وجود تفاعل كيميائى، هو انتقال من بحيرة إلى أخرى، أو من بحيرة إلى واد.

ويجب أن يجتاز الطريق قمة، أو من الأفضل أن يعبر ممرًا. ويستطيع علماء الكيمياء الكمية معرفة وضع الممر، أى الموقع النسبى للنواة، وارتفاعها. ويستطيعون حتى معرفة ما إذا كان الطريق الذى يقود إليها مباشر أو ملتو.

والآن يمكنهم أيضا استكشاف، قبل التجريبيين وبتكلفة أقل بكثير، علوم كيميائية طوباوية قابلة للتحقيق. مثال لذلك: الكيمياء الأكثر تجريبية هى ذات الذرات الخفيفة، الهيدروجين، والكربون، والأزوت والأكسجين، ونظائرها من الصف الثانى الطويل فى الجدول الدورى. ما الذى يحدث إذا استبدلنا الكربون بذرة ثقيلة، لها نفس عدد الإلكترونات الخارجية، مثل الجرمانيوم germanium أو القصدير etain؟ والنتيجة غير المباشرة للنسبية، أن تلك الذرات أكثر تحفظًا من الكربون فى مشاركة إلكتروناتها الأربعة الخارجية فى الأربطة، وتتردد فى السلوك مثل الرصاص، الذى يفضل عدم المشاركة سوى باثنين، وتنشئ كيمياء متلونة إلى

حد بعيد، بأربطة من نوع جديد، بإلكترون واحد أو ثلاثة إلكترونات، وهو ما تثبته التجربة بالتدريج.

يوطوبيا أخرى: هناك بنى مستقرة بما فيه الكفاية لكن قد يمكنها تخزين الكثير من الطاقة، القابلة للتحرر عن طريق التحلل. مثال لذلك يمكن أن يوجد مكعب N_8، وسيكون مستقرًا عند درجة الحرارة العادية، لكن تحلله إلى أربع جزيئات N_2، سوف يحرر طاقة ضخمة. وبالعكس تعتبر طرق تخليقه الاصطناعي عسيرة، لأن هذه حالة بحيرة في جبل لا يمكن الوصول إليها حتى الآن، حتى أستعيد تشبيهي الجغرافي.

وهناك مجال آخر حيث أثبتت الكيمياء الكمية أنها مفيدة، وهي تلك الخاصة بالتراكمات الصغيرة للذرات. فإذا أخذنا مثلاً عنصر الصوديوم، سنجد عند حد أقصى بلورة الصوديوم، وهي معدن حيث تكون الإلكترونات لا متموضعة إلى حد كبير، وفي الطرف الآخر الجزئ ثنائي الذرات Na_2 برابط تكافؤ تساهمي covalent بالأحرى. وبين هذين الطرفين، في بنية ذات ٤، أو ١٠ أو ١٠٠ ذرة، ما الذي يحدث؟ كيف يحدث الانتقال نحو المعدن وإعداده؟ بالنسبة للتراكمات الصغيرة، على الأقل، فإن الكيمياء الكمية تحمل إجابات مؤكدة، وبالنسبة للتراكمات الأكبر هناك نماذج أخرى، أكثر قربًا من غاز الإلكترونات، تحمل المعلومات الأكثر ملاءمة.

وهناك شكل آخر للمادة، السوائل الجزيئية. وهنا تنزلق الجزيئات وتدور وتهتز بالنسبة لبعضها البعض. ونحن هنا في كون ديناميكي. ويقتضي فهم خواص أي سائل أن نعرف جيدًا التفاعلات بين جزيئين، ويمكن بعده تقدير الطاقة الكامنة لجسمين، للاستخدام في الميكانيكا الاستاتيكية الكلاسيكية بتعيين الخواص العيانية لسائل. وأحيانًا لا تكفي صياغات ما بين جسمين، ولا يمكن إهمال التأثيرات غير الإضافية بالنسبة لثلاثة أو أربعة أو خمسة أجسام. وفي هذا الصدد يعتبر الماء من الناحية الجزيئية صعب المعالجة. لكننا ندرك الآن ما يكفي بواسطة المحاكاة

الزمنية لديناميكا الماء لكي نعرف المرورية القصوى للرابطة ما بين الجزيئات المحلية ولن توجد في هذه الحالة كيمياء كمية لمراهنة بكوبك على الافتراض غير الحقيقي المدعو "ذاكرة الماء" لبنفينيست Benveniste.

احتمالات ورهانات

كان ب. ج. دو جينيه P. G. de Gennes قد قال مؤخرًا عن الكيمياء الكمية أنه قد يكون من الواجب، وأنا أنقل عنه، "تعجيل احتضارها". ويجب أن نضيف أنه قذف بها في ضريح عام في صحبة طيبة، مع فيزياء الجوامد والفيزياء الذرية. هل هو موت الكمي؟ لا... ففرعنا المعرفي هذا، مثله مثل - وأقول مع - فيزياء الجوامد، أمامه الكثير ليقوم به وأمامه طموحات مواتية.

وعلى المستوى التصوري والمنهجي، فإن معاجلة حالات مستثارة هو الرهان الذي يحتاج جهودًا ضخمة، لأن تعريف ووصف للترتيب صفر، الذي تعتمد عليه وظيفة الموجة لكي تتهيأ، هو أمر صعب.

وعلى مستوى القوة والقدرة على مباشرة ومعالجة الجزيئات الكبيرة يجري حاليًا اختراق مهم، يشتمل على فهم الخوارزميات التي يتزايد بها زمن التنفيذ بشكل خطي مع نوع المنظومة التي تتم معالجتها. وهذه الهجومية تعتمد على ملاحظة جيدة: بالنسبة للجزيئات شبه الكلية، وبمقدار اهتمامنا بحالتها الأساسية، ليس هناك تأثير فيزيائي على المدى البعيد، ومن الممكن دائمًا بناء إما كثافة الموجة وإما وظيفتها انطلاقًا من لبنات محلية ذات امتداد محدود، بالتفاعل مع عدد محدود من لبنات مجاورة. ويتعلق الأمر هنا بعودة إلى توصيفات متموضعة حيث تؤكد الجيران على لا تموضع كان قد سبق كبحه. واستخدمت الفكرة على كل الهاملتونيات Hamiltoniens والسوسيليا Scuselia في مقالة نشرت حديثًا حسابًا يتعلق بجزئ فوتبالين footballene من ٨٦٤٠ ذرة كربون، تم تحسين هندسته إلى أقصى حد ممكن. لكن الفكرة ملائمة أيضا في إطار مناهج " من البداية ab initio" حيث يفكر

البعض منذ ٥ سنوات بأن الثورة البرجماتية لـ DFT سترسله إلى متاحف الفنون والمهن إن لم يكن إلى صندوق قمامة التاريخ. لكن الارتباط الإلكتروني، الذي يصعب جدا معالجته بشكل صحيح، يعتبر ذا مدى قصير. ومن الممكن التعيين المباشر للمداريات الجزيئية المحلية والتأثير على أساس حسابات ناشئة عن الارتباط الإلكتروني بأزمنة حساب لا تزيد إلا تناسبيًا مع عدد من الذرات. والمباراة التي تناقض الصرامة والفعالية البرجماتية لم تُلعب بشكل نهائي. وتفتح تلك المداخل من جانب آخر الطريق إلى معالجة الجوامد الدورية بتقنية " من البداية ab initio".

وهناك أيضا احتمال آخر للمستقبل، وهو يحمل للفيزياء لوازم مواد معارف أساسية حول طبيعة ومقدار التفاعلات المحلية، التي تتحكم في الخواص المشتركة لتلك المواد. ولمعرفة متى يصبح تكدس من وحدات تتكون من مانحين زائد مستقبل موصلات، يجب معرفة التفاعلات بين المانحين، وارتباطها بتغيرات الهندسة. من هنا فإن البنية الكميائية أساسية، كذلك تلك المعطيات التي تعتبر طاقات وأشكال المداريات الجزيئة المطلوب تقديرها وموقعها المكاني النسبي. ونفس الشئ بالنسبة للصروح المغناطيسية، والمركبات الهائلة المقاومة للمغناطيسية أو الموصلات الفائقة عند درجات حرارة عالية حرجة: لا يمكن فهم خصائصها المثيرة للدهشة إلا بمساعدة، ليس بهاملتوني مضبوط، معقد إلى حد بعيد، ولكن بنماذج هاملتونية تقلل عدد الإلكترونات المستخدمة وتبسط تفاعلاتها. ولكن أليس تبسيط ما أو غيره يكون إفراطًا؟ وما قيمة مثل هذا التفاعل؟ وكيف يتغير في تشوهات الشبكة؟ كمية من الأسئلة التي لا تحمل لها التجربة بشكل عام إجابة مشتركة، والتي تبين بشكل احتمالي اختصاصات للكيمياء الكمية. وأنا مقتنع بأنه يوجد هنا مستقبل مثمر جدا لفرعنا العلمي هذا. وعندما يكون الأمر كذلك، عندما نحصل على تلك المعلومات عن الفيزياء، فإن الكيمياء الكمية، علم التحول وعلم الهجين، لن تكون بعد ذلك هي فقط الكاشف الذي يصبح عن طريقه العلم أكثر علمية، أو الفيزياء، المنعكسة على علم أقل نبالة، أقل قيمة، بل اكتمال كل هذه المعارف. وبواسطة هذا الكاشف تعبر بطريق عكسي معارف لا غنى عنها للفيزياء.

وأيضا يجب أن نعرف ما هو في قدرتنا. منذ بداية ثمانينيات القرن العشرين كان علماء الكيمياء الكمية قد غاصوا بشدة في مـشكلة ذات اتـساع وذات أهميـة اقتصادية كبيرة، التحفيز غير المتجـانس catalyse heterogene، وهـى عمليـة تصبح من خلالها استحالة التفاعل الكيميائى فى الطور الغازى والسائل ممكنة على سطح معدن ما. لكن هذه المشكلة تجمع كل المصاعب، لأنها تتعلق بالمعـدن فـى حالة تحول، وسبق أن كان من الصعب معالجته نظريا، ومعالجة سطحه، الأكثـر صعوبة أيضا، وحتى يعيب على هذا السطح، وبتفاعـل كيميـائى عليـه! وعبـر السنوات التى انغمر العلماء وأجهزة الكمبيوتر خلالها فى هـذه المـشكلة الـسابقة لأوانها لم يحصلوا على معرفة مقنعة.

وبالعكس فإن المساعدة النظرية للتصميم الجزيئى، بتصور بنى جديدة، يجب أن تنطلق. ويجب أن يكون هناك علماء نظريات ذوو مخيلـة يعرفـون ويثبتـون بحساباتهم مركبات موهوبة مثلاً للتوازن الثنائى، ومن ثم القابلية لتخزين المعلومات على مستوى الجزئ، مما سيمثل طفرة خارقة فى اندماجية التخـزين. ومنـذ الآن تنطلق يوطوبيا إلكترونية جزيئية، مع أسلاكها، وصمامات الديود diodes (الصمام الثنائى) الخاصة بها،، تحت دفع عقول جسورة.

أسئلة فى غير محلها

للانتهاء ولفهم ولو جزء قليل من هذا المجال أود أن أضع بعـض الأسـئلة التى تتجاوز إطار عرض علمي عادي، حيث إنها موجهة إلى غير اختصاصيين.

أولاً لماذا يكون هناك علماء كيمياء كمية؟ لا يزود التقسيم تجربة / نظريـة الفيزياء بشكل مؤسسى كما أعطى للكيمياء، حيث هناك مختبرات للكيمياء الكميـة. والرد على هذا السؤال يكون في الوقت نفسه تجريبيًا وثقافيًا. والمسافة بين نـشاط عالم كيمياء التخليق الاصطناعى ونشاط عالم كيمياء الكم أكبر منهـا بـين عـالم الفيزياء التجريبية، الذى يتعامل مع علوم طيف معقدة، سبق تقييمها فـى النمـوذج

الكمى، وزميله عالم النظريات. وإلى ماذا تضاف حقيقة أن أغلب علماء الكيمياء ليس لديهم لا الذوق ولا القواعد التى تتيح لهم تملك مفاهيم مجردة لأدوات شكلية غير حدسية. لكن هذه الثغرة قد تُنسب جزيئيا إلى الجهد الضئيل لنقل معرفتهم بواسطة علماء النظرية.

مع ذلك هناك شيء ما فى طريقه للتغيّر. هناك برامج كمبيوتر أصبحت متاحة من الآن فصاعدًا، مقابل أموال، يمكن للكيميائيين غير الاختصاصيين استخدامها مثل "صناديق سوداء" أو نوع آخر من أجهزة قياس الطيف. ولا تحتاج إلا إلى وصفات سهلة تتعلق بإدراك مشكلتهم وقراءة النتائج. وربما ستغير هذه الثورة من نسب نظرية / تجربة. وقد يمكنها فى كل الحالات أن تؤدى إلى إعادة النظر فى أسلوب تعليم الكيمياء الكمية، الذى يتّبع حتى يومنا هذا طرقًا وعرة للاستنتاج ويترك الدارسين منذ أول الطريق بدون حافز، بين المفاهيم الصورية الغامضة والممارسات السخيفة. وربما يجب وضع هذا التعليم وراء الظهر، وإقناع الدارسين أولاً، بفضل استخدام تلك الصناديق السوداء ذات النتائج القياسية، وبفضل وجاهة وفعالية الكيمياء الكمية، حتى يمكن جذب حب الاستطلاع لديهم ومساعدتهم على الاتجاه، بواسطة علماء الكيمياء دون شك، نحو مضمون المفاهيم الصورية المستخدمة.

هل النظرية موجهة بواسطة منطق داخلى أم بواسطة طلب ما، نوع من تأثير السوق؟ لقد ذكرت بالفعل تلك الشفرات الصناديق السوداء، التى يتم إنتاجها وبيعها بواسطة مجتمعات خاصة تجمع علماء النظريات وعلماء المعلومات. وتريد الكيمياء الكمية، المعقدة بسبب إهمالها الطويل، أن تقدم براهينها، ويعتقد البعض بضرورة أو أنه من المربح إيداع تلك المجتمعات الخاصة الصغيرة ببضع عشرات من الأشخاص. وقد يتعلق الأمر بشكل أقل بسوق حتى الآن أكثر منه استباق لحاجة محتملة، تلك الخاصة بالشركات الصناعية الكيميائية، والصيدلانية والكيميائية البيولوجية. ومن المؤكد أن الهدف المتوقع – وهو "الجزيئات الكبيرة" – قد غيّر اتجاه تطبيق هذا الفرع العلمى، وأبرز الاهتداء السريع لمدخل "من البداية

"ab initio" لـــ DFT. ويمثل ج. بوبل J. Pople أحد المـــساهمين النـــشطاء فـــي تصور منهجية " من البداية ab initio" ولقد أسس فـــي الوقـــت نفـــسه أول تلـــك المجتمعات الخاصة. وفي يوليو ١٩٩١ أحدث شجارًا شديدًا ضـــد و. كـــون W. Kohn والـــ DFT، قبل أن يرتد فى ستة أشهر إلى هذا المـــدخل الجديـــد، وهـــو بالطبع أكثر إغراء بالنسبة للسوق. وهو ما حصل عليه حيث إنه تقاسم مـــع كـــون منذ سنتين جائزة نوبل للكيمياء.

هل الكيمياء الكمية علم أم تقنية؟ من المؤكد أن هذا الفـــرع العلمـــي يعبـــئ الكثير من التكنولوجيات. وبقدر المستطاع حيث يقوم بوظيفته بـــوفرة، قـــد يقـــول البعض إنه دون سواه يفعل ذلك، ويعتبر أساسيًا في مـــساعدة أجهـــزة الكمبيـــوتر، والتنبيه إلى المصادر المعلوماتية وتطورها. وأنا أرى بالفعل خطرين فى جعل هذا الفرع العلمي تقنيًا بشكل مفرط.

الخطر الأول يتمثل فى عبادة الرقم، الذى له حد قد يصبح خطـــرًا بالنـــسبة للنظرية نفسها. ولقد قال ليفى – ليبلون Levy - Leblond وهو محق أن المحاكـــاة الرقمية ليست نظرية. وقد تتأسس المحاكاة على وضع النظرية فى حسابها، وهـــى المتكونة من تصورات، ومن قوانين وطرق استنتاج. والحساب لا يـــستنتج، فهـــو يؤثر دون المشاركة فى منطقنا. وإذا انحرفت نحو الشبكة العصبية الفعالة، قد تفقد المحاكاة تماسها مع النظرية. ألا يمكنها عندئذ أن تنهك النظرية؟

والخطر الثانى هو باب الغواية. إذا لم نتحمس إلا للفعالية، والقـــدرة، فإننـــا نضع مثالاً أعلى نحتاج إليه، صورة متخصص فى المعلوماتية مجتهـــد، صـــورة يمكن أن نخشى أنها لن تجتذب العقول الأكثر إبداعًا. وفى الواقع فإن المعلومـــاتى يستهوى، إنه عبد استعبادى. ويقضى زملائى الشباب وقتهم أمام الـــشاشة، حيـــث يقرأون قرار آخر مسعاهم ويلقون القرار اللاحق. ولم يعد لديهم وقت، أو يبقونـــه لامتيازات النخاسين من طرازى، لتلك المعارك المنطقية مع بنية مشكلة قطعية، أو لتلك الأبحاث الطويلة حول "عبور شمال – غرب" الذى يميز النظرية.

وحتى استغلال النتائج الرقمية يعانى من الترقيمية numerisme. فأنت تعمل على مركب غريب الأطوار، افتراضى، وتحسب بالتأكيد وجـوده الـذى يمنحـه طاقته، وبنيته، وتردداته الاهتزازية. لكن تلك النتائج قد تستجيب لتحليلات أخـرى أكثر نوعية: أين تكون الإلكترونات، ما الروابط التى تحافظ على هذه البنية، هـل يتعلق الأمر بنموذج أولى prototype جديد، بقطعة جديدة أضيفت إلى ليجو Lego علماء الكيمياء الجزيئية؟ عندما نعسكر فى مرج ضيق للوضعية الرقمية، وعنـدما تعلن مثل هذه الكراهية للكيفى، وللتفسير المزين بالصور، وعندما نقفل على أنفسنا فى صرامة الفعل، لن نفتقد فقط إحدى وظائف عالم النظريات، ووظيفته اللغويـة، ومورِّد لتصور عن العالم، ولكننا نحرم أنفسنا من متعة جمالية.

أى مكان يشغله بالفعل الجمالى فى هذا العلم؟

يتم تقديم هذا الفرع العلمى غالبًا على أنه صارم، ويوفر مـع ذلـك متعًـا ضخمة. أولا باللعب بهذه اللغات الثلاث، شعوذة التفسيرات بـين لغـة "تكـافؤ – رابطة – وثبة Valence - Bond" (بمصطلحات الصناديق الذرية)، وتلك الخاصـة بالمداريات الجزيئية للروابط، وذلك الخاص بالمداريات الجزيئيـة اللامتموضـعة. وفى الواقع يمكن أن تكون الفيزياء مبهمة فى تفسير ثم تصبح نقية فى تفسير آخر.

بعد ذلك متعة الكشف. والكيمياء، فى اختلاف مع الفيزياء، لا تعمل بواسطة صياغة القوانين، إنها معرفة النوعى. لكنها تعرف "تأثيرات" شاملة بما فيه الكفاية، حتى إننا نحصل على متعة عند الإثبات والفهم.

وبالنسبة لعالم النظريات الشكلى، تكون المتعـة تلـك المتعلقـة بالتحـديات المنطقية المتفرعة عن المشاكل الشاملة، مع تجاوز الإطار الضيق للفرع العلمـى. وإنها أيضا لمتعة للمهندس أن يصيغ مدخلاً جديدًا، أكثر أناقة و/ أو أكثر دقة مـن تلك الصيغ التى كانت متاحة سابقًا.

وبالنسبة لخصب الخيال فمن حسن الحظ وجود ابتكارات بنيويـة، ومتعـة مضاعفة لصياغة يوطوبيات كيميائية والقدرة على إثبات التناسق بسرعة كبيرة.

والكيمياء الكمية، هل هى العلم الهجين بين الفيزياء والكيمياء، العلم غير المريح الذى يرتكب حماقات الخفاشات، صعوبة علماء فيزياء فى عيون علماء الكيمياء، علماء الكيمياء المساكين فى نظر علماء الفيزياء؟ إنها شيء آخر غير المعبر أو علم التحويل، لقد أنتجت ثقافة نوعية فى التوتر حيث يعيش بين ثلاثة أقطاب تحفزه وتمزقه:

- وظيفة تفسيرية، للفهم، وتكوين التصورات.
- اهتمام بالصرامة الشكلية الشديدة، وخاصة فى التعامل مع الهاملتونية Hamiltonien الصحيحة.
- الاهتمام المهووس بدقة تنبؤاتها.

وأنا أميل إلى الرأى القائل بأن هذا العلم، الهجين ولكن الأصيل، له مستقبل مبهر ولديه مصادر كافية وما يكفى من الألغاز أمامه لكى يجذب العقول الشابة صعبة الإرضاء.

كيمياء التربة[٢٨]

بقلم: أندريه أمبليه
André AMBLES

ترجمة: عزت عامر

التربة وسط ضرورى للعديد من الكائنات الحية. وهى تؤلف مفاعلا بيولوجيًا حقيقيًا حيث تحدث العمليات الرئيسية المتعلقة بتحول المادة العضوية. وهى تلعب أيضا، للأسف، دورًا يتشابك مع كل ظواهر تلوث بيئتنا. والمادة العضوية التى تحتوى عليها لا تزال أيضا غير معروفة جيدًا للبشر، ولم تبدأ الأعمال المتعلقة ببنيتها إلا منذ نحو خمس وعشرين سنة. ولدى الباحثين العاملين فى هذا المجال اهتمام أساسى ثابت، لكنه أيضا اهتمام تطبيقى. وفى الواقع فإن زيادة التعداد السكانى العالمى وتطورات الأنشطة البشرية تؤثر أكثر فأكثر على عمل وخواص التربة. ولاهتمامات اقتصادية تمامًا فضلت البلدان الصناعية التطوير الزراعى الكثيف، والإقلال من تنوع التطبيقات الزراعية والإفراط فى الزراعة الأحادية. ويتم استخدام المزيد والمزيد من الأسمدة المعدنية مما يضر بزبل التسميدات أو أسمدة المزرعة العضوية. وبالتالى فإن نسبة المادة العضوية تقل. وتؤلف المادة العضوية مع ذلك الأساس الضرورى لتطور الحياة البيولوجية للتربة، فهى التى تحدد فى الواقع خواصها الكيميائية، والفيزيائية والبيولوجية. والمشكلة الراهنة الخطيرة لتآكل التربة (التآكل المتعلق بالريح أو العائد إلى جريان الماء) يعتبر الجزء الكبير منها نتيجة المحتويات غير الكافية من الكربون العضوى.

والمادة العضوية تكوّن الأساس الجوهرى لتطور الحياة البيولوجية، لأنها المصدر الرئيسى للكربون والطاقة بالنسبة للكائنات الحية المجهرية. وكما سنرى

---

(٢٨)نص المحاضرة رقم ٢٣٤ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢١ أغسطس ٢٠٠٠.

فإنها تحسن الخواص الكيميائيـــة (مخزونـــات الكربـــون، والأزوت والفوســـفور) والفيزيائية (النفوذية، والقدرة على الاحتفاظ بالماء وقدرته على الدوران، والتوازن البنيوى). لذلك فهى ضرورية للمعرفة الأفضل بسياقات عمل التربـــة مـــن أجـــل استخدام أفضل لها والمحافظة عليها. وبالتالى يقتضى الأمر دراسة المادة العضوية التى تتكون منها التربة.

المادة العضوية للتربة

أصل المادة العضوية للتربة

فى البداية يتيح التخليق الضوئى photosynthese للنباتات العليا أو الـــسفلى تحويل الكربون المعدنى، والغاز الكربونى أو CO_2، إلى كربون عضوى (الـــشكل ١). وهكـــذا تخلّـــق النباتيـــات مكوناتهـــا، الأنـــسجة المختلفـــة، والخـــشبين،[٢٩] والفلّينين[٣٠].. إلخ. وفى وسط مائى أو بحرى، فإن الكربون المعدنى الذى يمكـــن اســـتخدامه يكـــون علـــى هيئـــة كربونـــات CO_3^{2-} أو كربونـــات مهدرجـــة hydrogenocarbonate (HCO_3^-) متوازنة مع CO_2. ويجب أن نذكر أن النباتات لا تستطيع استخدام أو تحويل فضلاتها أو بقاياهـــا العـــضوية. وذاتيـــات التغذيـــة autotrophes هى القادرة فى عالم معدنى على أداء ما يجب عليها عمله لتحقيـــق تخليق جزيئات ضرورية للقيام بوظائفها. وإعادة التدوير الضرورية للمادة الأوليـــة تتضمن وجود عضويات التغذية heterotrophes التى يمكنهـــا اســـتخدام المـــادة العضوية التى سبق إعدادها كمادة أولية وكمصدر للطاقة (الشكل ١). تلك هى فكرة عن السلسلة الغذائية، فالنباتيات هى المنتِجات، ثم تتدخل المستهلكات والمحلـــلات. وتنفس الفاعلين المختلفين، متضمناً الكائنات الحية المجهرية فى التربة، يعيد إطلاق الغاز الكربونى فى الجو.

---

(٢٩) الخشبين lignine: مادة تحدث التخشب. (المترجم)

(٣٠) الفلّينين suberine: مادة عضوية يتركب منها الفلين. (المترجم)

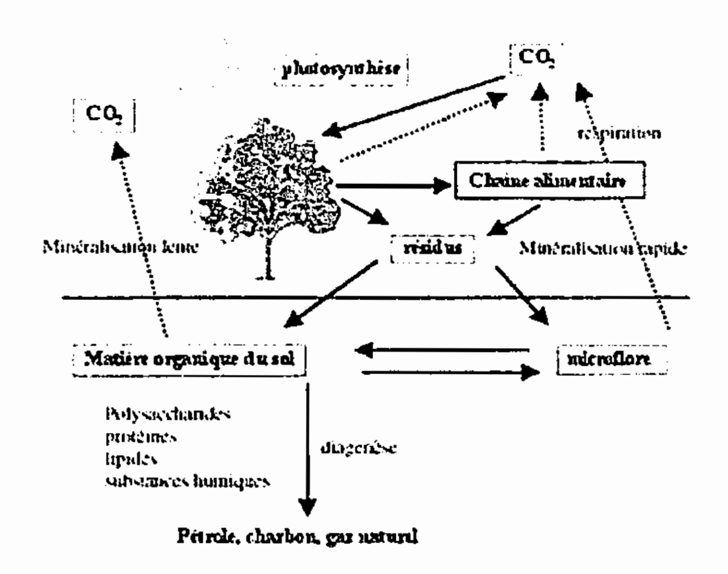
وفى سيرورة تحلل البقايا الحيوانية أو النباتية، يتم تجميع جزء من الكربون فى الأنسجة الميكروبية، وجزء آخر يتم تحويله إلى التربة العضوية المستقرة. وتحلل المتبقيات النباتية والحيوانية هو مجمل سيرورة بيولوجية تتيح بواسطة التعدين أو التنفس إعادة إطلاق الكربون فى الجو على هيئة CO_2. ويتم تحويل الأزوت الحر إلى أيونات أزوتات nitrate ions (NO_3^-) أو أمونيوم (NH_4^+)، والكبريت والفوسفور إلى أيونات كبريتات (SO_4^{2-}) وفوسفات (PO_4^{3-}) أو أشكال مناظرة قابلة للتمثل بواسطة النباتات.

محتوى التربة من الكربون العضوى

يتغير المحتوى من المادة العضوية لأنواع التربة بشدة تبعًا لطبيعتها. وقد يمثل من ٥ إلى ٦ فى المائة من وزن التربة الجافة لكل مرج (أول ١٥ سنتيمتر) وأقل من ١ فى المائة للتربة الرملية. وقد يصل المحتوى إلى ١٠ فى المائة بالنسبة لأنواع التربة الفقيرة سيئة الصرف و٨٠ فى المائة أو أكثر فى أرض التِّرب tourbieres. وتقدم أنواع التربة الاستوائية تركيزات ضئيلة، وتؤدى أحوال درجة الحرارة والرطوبة، إلى أن انقلاب turn - over المادة العضوية يكون مرتفعًا (جدا). ويتغير محتوى الكربون C والأزوت العضوى N بشكل عام بشكل متواز (النسبة C/N من ١٠ إلى ١٢ فى المتوسط).

ومن المثير مقارنة كميات الكربون الموجود فى أنواع التربة وفى المستودعات الأخرى لسطح الكرة الأرضية. ويمكن إثبات أنه على السطح تكون كمية الكربون العضوى (من ٣٠ إلى ٥٠ x ١٠^١٤ كجم) أعلى على قمة مستودعات أخرى (CO2: ٧ x ١٠^١٤ كجم، البيوماس: ٤,٨ x ١٠^١٤ كجم، المياه العذبة: ٢,٥ x ١٠^١٤ كجم، الكربون البحرى: من ٥ إلى ٨ x ١٠^١٤ كجم).

ويحدد عدد كبير من العوامل محتوى المادة العضوية فى أنواع التربة. ومن بين تلك العوامل، يمكن تمييز المناخ الذى يحدد طبيعة النباتات، والإنتاجية النباتية،



الشكل (١)

دورة الكربون

والنشاط الميكروبى. وتفضل المناخات الرطبة الغابات. وإذا كانت الرطوبة كافية، يكون الإنتاج النباتى متزايدا. وتتضمن أنواع تربة المرج كميات ضخمة من التربة العضوية حيث يكون التكوين مهمًا فى الشريط الترابى الذى يحيط ويتأثر بجذور النباتات rhizophere. وإذا زادت درجة الحرارة، تنخفض نسبة التربة العضوية نظرًا لوجود زيادة فى النشاط الميكروبى. وعلى هذا النحو، فإنه فى مناخاتنا المعتدلة، تحتاج فِراش الدَّواب فى غابة إلى سنة للتحلل. وليس هناك عمليًا فراش دواب تحت تأثير المناخ الاستوائى (وهى الأحوال المفضلة للتحلل البيولوجى).

مصير الكربونَ العضوى فى التربة

حاولت دراسات متعددة تحديد مصير الكربون العضوى فى التربة باستخدام ركائز معلَّمة بالكربون ١٤. وبوضعها على الحركية الوحيدة، يمكن تمييز ثلاثة

أصناف رئيسية للمادة العضوية: (١) البقايا النباتية (أو زبل التسميدة المجلوب) والكتلة الحيوية[٣١] biomasse المصاحبة التى تتحول خلال بضع سنوات، (٢) الآيضات[٣٢] الميكروبية أو الخلوية ومنتجات التحول التى "تستقر" فى التربة وتكون انقلابية خلال مدة بين ٥ إلى ٢٥ سنة. و(٣) الكسور التى يطلق عليها مقاومة (تصبح مقاومة أو مقاومة أصلية) ويكون لها انقلابية من ٢٥٠ إلى ٢٥٠٠ سنة. ونصل من ثم إلى مفهوم التربة العضوية - أو مركبات رطبة - الأكثر استقرارًا من البقايا النباتية الأصلية إزاء نشاط الكائنات المجهرية فى التربة.

وتلك السيرورة التى يطلق عليها التدبيل[٣٣] وليست مادة الدُبال[٣٤] ساكنة فى التربة النشيطة، حيث تتحلل بالتدريج وتناظر إذن مخزونًا من الكربون العضوى فى التربة.

عوامل مسئولة عن تحول الكربون العضوى فى التربة

يتحقق التحلل والتحول للمادة العضوية فى أنواع التربة بعدد محدد من الكائنات أو الكائنات المجهرية. وأولها جميعًا ديدان الأرض وحيوانات مختلفة تقلل حجم البقايات النباتية المبلولة. وتلعب ديدان الأرض دورًا مهمًا: تفرز مادة عضوية دقيقة مصاحبة بدقة لمادة معدنية (تتضمن كذلك نوعًا من مادة ما قبل الدُبال، وهى مادة تقترب من تلك التى تنتجها الأرضة[٣٥] لبناء المأرضة).[٣٦] ثم تأتى بعد ذلك هجمة ميكروبية (بكتيريا، فطريات..إلخ). وقبل كل شىء يتم استخدام المواد

---

(٣١) الكتلة الحيوية: مجمل كتلة الكائنات الحية فى مساحة معينة. (المترجم)

(٣٢) الأيضة metabolite: مادة ناشئة عن الأيض، أى عن التحول الغذائى. (المترجم)

(٣٣) التدبيل humification: تحويل (أو تحول) المواد العضوية إلى دُبال. (المترجم)

(٣٤) الدُبال humus: مادة عضوية متحللة فى التربة بفعل المفككات على بقايا وفضلات النباتات والحيوانات. (المترجم)

(٣٥) الأرضة termite: دودة الخشب. (المترجم)

(٣٦) المأرضة termitiere: وكر الأرض. (المترجم)

العضوية الأكثر سهولة فى تحللها (السكريات....). وتتم حالات الأيــض جزئيًــا للكربون - يعطى طاقة - وجزئ آخر يتم استخدامه فى التخليق الخلوى (مــن ١٠ إلى ٢٠ فى المائة تبعًا للتربة والأحوال المناخية) - لذلك فهو يقوم بدور مادة أولية - وجزء آخر يتحول بالتدريج إلــ دُبال.

وبجانب ديدان الأرض والحيوانات الأخرى للتربة، بعدد متغير جدا، هنــاك عوامل تحقق تحول المادة العضوية هى البكتيريا (١ مليار لكل جرام من التربــة، وربما أكثر)، والفطريات الشعاعية actinomycetes[٣٧] (عدة مئات من الملايــين لكل جرام من التربة)، والفطريات (من ١٠ إلى ٢٠ مليون لكل جرام من التربــة)، والطحالب والأوليات protozoaires.[٣٨]

متوسط عمر الكربون العضوى

مبدأ زمن التواجد

من المشوق بالتأكيد تحديد عمر متوسط للمادة العضوية فى تربة ما، هذا هو زمن مكان التواجد (الإقامة) temps de residence. وهذا أمر صعب، فالأعمــار المطلقة لا يمكن تحديدها: هناك فى الحقيقة تحلل مستمر للتربة العضوية القديمــة وتخليق موازٍ لتربة عضوية جديدة. ولا يمكننا أن نحدد سوى عمر متوسط.

وتشير الدراسات المتنوعة التى تمت حول هذه النقطة إلى تنوعيــة كبيــرة جدا، من ٢٥٠ إلى ١٩٠٠ سنة بالنسبة لمدى الــسطح. ويــزداد زمــن التواجــد المتوسط مع الأعماق. وعلى سبيل المثال، بالنسبة لتربة كندا، فإن زمــن التواجــد المتوسط يصل إلى ٨٤٠٠ سنة فى العمق، مقارنة بـــ ٥٥٠ سنة لمستوى السطح. ويتغير زمن التواجد أيضا تبعًا لطبيعة المادة العضوية، حيث الدبالى humine أكثر مقاومة بشكل عام من الشحميدات lipides (سوف يتم تحديد هذا التصنيف فيما يلى

---

(٣٧) تعتبر الفطريات الشعاعية أو الحارشيات نوعًا من الفطريات المجهرية تقترب من البكتيريا، وتشكل فئة.

(٣٨) حيوانات أحادية الخلية. (المترجم)

من العرض). وهكذا فإنه فى تربة مرج فى داكوتا Dakota، يكون للدبالى زمن متوسط هو ١١٥٠ سنة، فى حين أن الزمن المتوسط للمادة العضوية الكلى هو ٨٧٠ سنة، وهذا يتضمن تنوعًا شديد الاتساع، أى تباين heterogeneite المادة العضوية. وكسور المادة العضوية المصاحبة لمواد الصلصال تكون أزمنة تواجدها مرتفعة بشكل عام، مثلاً ٨٠٠٠ سنة. والمادة العضوية المُمتصة، أو المتضمنة فى صفائح الصلصال تكون محمية من النشاط البيولوجى.

دور المادة العضوية فى التربة

خواص كيميائية

تمثل المادة العضوية مخزون الكربون، والفسفور P والأزوت N والكبريت S الموجود فى التربة. وكما رأينا فإن هذا المخزون ضرورى لكل أشكال الحياة الموجودة على التربة (النباتية) وفى التربة (الكائنات المجهرية المختلفة). وبالنسبة للأزوت والفسفور والكبريت، هناك توازن بين الأشكال المعدنية والعضوية. والعمليات التى تتدخل هى التمعدن mineralisation والتثبيت immobilisation (مفهوم المخزون).

التمعدن: P عضوى ← P معدن، أى فسفاتى (PO_4^{3-})
S عضوى ← S معدنى، أى سلفات (SO_4^{2-})
N عضوى ← N معدنى، أى نترات (NO_3)
التثبيت: فسفاتى ← P عضوى
سلفات ← S عضوى
نترات ← N عضوى

وتوجه هذه التوازنات عدة بارامترات، ويضاف إلى ذلك أن كل عنصر رئيسى يكيف توازن التمعدن - تثبيت للعنصر المجاور (مبدأ نسبة الكربون / أزوت C/N، كربون /فسفور C/P، كربون/ كبريت C/S..إلخ.

وعلينا أن نعرف أن الأشكال المعدنية هى فقــط التــى تـستطيع أن تُمثــل بواسطة النباتيات.

خواص بيولوجية

وتعتبر المادة العضوية، كما رأينا، مصدرًا للكربون والطاقة بالنسبة للكائنات المجهرية، عند تخليق نسيجها مثلاً. ومع ذلك يجب أن نلاحظ أن بعض الجزيئــات العضوية يمكنها أن تلعب دورًا سيئًا، مثلاً بعض مركبات التربين[٣٩] الطبيعية تحت غابة صنوبر، أو جزيئات أنسجة من الصناعة الكيميائية: دور كابح علــى إنبــات الحبــوب وعلــى النمــو النبــاتى، وســمية نحــو النباتــات المجهريــة microflore....وبالتالى تتراكم المادة العضوية بكثرة ونصل إلى مفهــوم التــسمم الذاتى auto - intoxication فى المنظومات الطبيعية القاحلة.

خواص فيزيائية

تعتبر المادة العضوية عامل ترجيح بالنسبة للاستقرار البنيوى للتربة، وتلعب دورًا رابطًا بين الجزيئات، مما يتحيح تكوين أنواع الركام.[٤٠] والتفاعلات الرئيسية هى الترابط معدنى - معدنى، معدنى - صلصال، صلصال - صلــصال. وتتــيح المادة العضوية من جانب آخر تهوية أفضل للتربة (وهو بــارامتر مهــم بالنــسبة للنشاط البيولوجى) ووجوده بكميات كافية يعتبر عاملاً مهمًا للقدرة على حجز مــاء التربة (وهو مهم بالنسبة للنباتيات) ودوران الماء فى التربة. عندئــذ نفهــم بــشكل أفضل سبب أن الممارسات الزراعيــة الحديثــة - الزراعــة الكثيفــة، وزراعــة المحصول الواحد، والاستخدام المكثــف للأســمدة المعدنيــة (الأزوت، الفــسفور،

---

(٣٩) تربين terpene: واحد من مجموعة المركبات الهيدروكربونية السهلة البخر. وهو يوجد فى كثير من أنواع النباتات، ويمكن الحصول عليه منها بالتقطير. (المترجم)

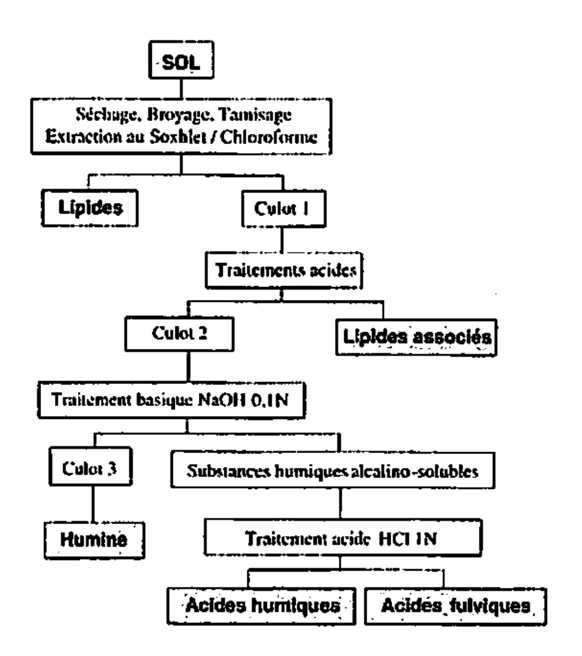
(٤٠) الركام agregat: مجموع مواد مختلفة متلاصقة. (المترجم)

البوتاسيوم) فى الإضرار بالتسميدات والمركبات العضوية، وإزالة الأعشاب المضرة بصورة منتظمة، وإزالة الأشجار وتسوية الأسيجة - تعتبر نتائج بالغة السوء على خواص التربة. ولا يمكن التعويض بعد لتصدير الكربون العائد إلى عمليات الحصاد، وبالتالى فإن نسبة المادة العضوية تتضاءل. وعلى هذا النحو فإن تآكل التربة قد أصبح مشكلة مقلقة حتى فى فرنسا. كذلك هناك تآكل متعلق بالريح وتآكل ميكانيكى تحت تأثير الأمطار، ويخترق الماء التربة بطريقة ما ويجرف جزيئات التربة. وتتفاقم المشكلة بإزالة الواقيات الطبيعية (الغابات، والمروج، والأحراش التى تنتج الكربون العضوى بالإضافة إلى ذلك فيما يقترب من المنطقة الزراعية) وبممارسات أخرى مثل الحراثة فى اتجاه الانحدار. وعلى سبيل المثال، تمت الإشارة إلى هذه المشكلة حديثًا فى الصحافة القومية فيما يتعلق بكرمات العنب فى تلال سانسروا Sancerrois، التى تفاقمت بإبادة الأعشاب بشكل منتظم والتى تُمارس حاليًا.

دراسة نوعية للمادة العضوية للتربة

الأشكال المقاومة (المستقرة) للمادة العضوية فى التربة هى الشحوم والمواد الدبالية: أحماض الفولفيك fulviques، والأحماض الدبالية humiques والدبالى humine. ومن المسلم به أن الأشكال الأخرى مثل البروتينات، والسكريات... إلخ تتحلل بسرعة كبيرة ويتم استخدامها. ويتم الحصول على هذه الأجزاء بتطبيق البروتوكول التالى (الشكل ٢):

- تناظر الشحميدات المسماة حرة الجزء القابل للذوبان فى المحلول العضوى، إذن فهى مستخرجة مباشرة بواسطة المحلول العضوى انطلاقًا من عينة من التربة.
- تُستخرج الشحوم المسماة مشتركة بعد إتلاف المواد الغروانية العضوية المعدنية organo - mineraux (المواد الصلصالية..إلخ) بواسطة معالجة حمض كلوردريك / حمض فلوردريك fluorhydrique.



الشكل (٢)

بروتوكول الفصل

- يتم استخلاص أحماض الفولفيك والدبالية فى وسط قاعدى (محلول الصودا). لذلك فهى غير قابلة للذوبان فى مذيب عضوى. وفى وسط حامضى، تترسب الأحماض الدبالية وتنفصل من ثم عن أحماض الفولفيك التى تظل قابلة للذوبان.

وتناظر البقايا النهائية، المصاحبة للمادة المعدنية الباقية، المواد الدبالية.

وهكذا باختصار، فإن الفئات الأربع الكبيرة للمادة العضوية هى الشحوم القابلة للذوبان فى وسط مائى لكل قيم pH، والأحماض الدبالية القابلة للذوبان فى وسط مائى قلوى والدباليات غير القابلة للذوبان كلية. ومن المهم الإشارة إلى أن هذه التصنيفات لا تناظر فئات دقيقة للمركبات العضوية، لكنها، فى الوضع الراهن للمعارف، لا تحدد إلا على قاعدة بروتوكول تحليلى (للاستخلاص extraction). وذلك عائق، وغموض يعرقل حاليًا الكثير من العلماء.

وتختلف نسب هذه الأجزاء العضوية كثيرًا من تربة إلى أخرى، وتشيع المواد الدبالية بشكل خاص فى التربة التُربية[٤١] ومناطق التُرب.

وتحتوى المواد الدبالية على ما يتراوح بين ٤٠ و٦٠ فى المائة من الكربون، وبين ٣٠ و٥٠ فى المائة من الأكسجين مع قليل جدا من الأزوت، والفسفور والكبريت. وتحتوى أحماض الفولفيك على أكسجين أكثر مما تحتوى عليه الأحماض الدبالية. والأكاسيد الدبالية والمواد الدبالية ذات تركيب متقارب، وربما يعود عدم النفاذية الكلى للمواد الدبالية إلى تعقد بنيوى أكثر شدة وإلى ارتباطها بالمادة المعدنية، والصلصال والفلزية... إلخ.

وللشحوم بنى أكثر بساطة وتشكيلة وزن جزيئى أكثر ضآلة منها لدى المواد الدبالية. وبالنسبة لتلك الأخيرة فإن الوزن الجزيئى يتراوح بين بضع عشرات إلى عدة مئات من الآلاف من وحدات الكتلة الذرية. ونقدم بعض الأوزان الجزيئية على سبيل المقارنة:

- الماء: ١٨، الغاز الكربونى: ٤٤، حمض الخليك (الموجود فى الخل): ٦٠.
- الكولسترول: ٣٨٦، حمض الزيتيك oleique (حمض دهنى غير مشبع بـ C18 "له ١٨ ذرة كربون" الموجود فى زيوت الأطعمة): ٢٨٢.

ويزداد الوزن الجزيئى فى اتجاه:

أحماض فولفيك ← أحماض دبالية ← مواد دبالية

والأحماض الفولفيك والأحماض الدبالية موجودة فى المياه التى يكون لها أوزان جزيئية أقل من تلك الموجودة فى التربة. ولذلك يمكنها الدوران فى طور مائى وتكون من ثم موجهات مهمة، بسبب خواصها المعقدة، وانتشار الملوثات، مثلاً نحو طبقات حقول الماء الجوفية انطلاقًا من السطح.

---

(٤١) التُربى tourbeux: أو الخُثى، هو المتعلق بالتُرب أو بالخَث، وهو تراب عضوى قابل للاشتعال يتكون من الانحلال البطىء لبعض النباتات الطحلبية. (المترجم)

وتعتبر الشحوم، الأكثر كرها للماء hydrophobes، أقل تغيرا إلى حد كبيـــر أو يمكن أن تتغير فى طور مائى. وهنا مع ذلك يهاجر عدد معين من الفئة المحتوية على مجموعة وظيفية محبة للماء hydrophile (حمض دهنى، كحول... إلخ).

الشحميدات

ويحتوى الجزء الخاص بالشحميدات lipides "الحرة" أو "المـــشتركة" علـــى عدد كبير من الفصائل التى يمكن فصلها ثم تحليلها بشكل أساسى بواسطة تقنيـــات كروماتوجرافية[٤٢] فى طور غـــازى شـــعرى، طـــور ســـائل مقتـــرن بطيفيـــة spectrometrie كتلة (ويطلق عليها شحوم بسيطة). وليست هـــذه حالـــة الـــشحوم المركبة أو الجزيئية العينية macromoleculaires التى لا يمكن تحليلهـــا مباشـــرة (vide infra).

وفى الفصائل التى تحتوى على عدد كبير من الجزيئات، يمكـــن أن تكـــون مختـــصة بأصـــل معـــروف، ويطلـــق عليهـــا مـــسجلات marqueurs. ولـــدى الهيدروكربورات (تحتوى فقط على الكربون والهيدروجين) الرئيسية فـــى التربـــة عدد مفرد من ذرات الكربون، فى أغلبه ٢٩ و٣١ ذرة كربون (C_{29}, C_{31}). وهـــى تنتج عن أنسجة واقية لنباتيات عليا. وبالنسبة للنباتيات السفلى مثل الطحالب، تكون الهيدروكربونات قصيرة C_{17}. وتتضمن الأحمـــاض الدهنيـــة (أحمـــاض أحاديـــة الفحمائيلية monocarboxyliques) فئة مثيرة (الشكل ٣). وهـــى خطيـــة، بـــشكل رئيسى بعدد زوجى من ذرات الكربون، من C_{10} إلى C_{36}. وقد تكون مـــشبعة أو غير مشبعة، برابطة مزدوجة كربون – كربون بديل فى هذه الحالة الأخيرة لذرتى هيدروجين (حمض زيتيك oleique). وتكون القصيرة ($< C_{20}$) موجودة فـــى كـــل مكان (مثل أحماض النخليك والدهنية).[٤٣] وتكون الطويلـــة مـــن أصـــل نبـــاتى.

---

(٤٢) تحليل كروماتوجرافى chromatographie: طريقة خاصة فى فصل أجزاء مركب. (المترجم)

(٤٣) حمض دهنى stearique: حمض يكثر فى شحم الحيوانات ويستخدم لصنع الشموع. (المترجم)

والأحماض المتشعبة لها سلسلة ليست خطية، متماثلة iso- وسابقة التماثل anteiso C_{15} أو C_{17} تكون بكتيرية نموذجيـا. وتكـون مزدوجـة الحمـض والأحمـاض الهيدروكسيد hydroxyacedes (الشكل ٣) طبيعية (فلّينين suberine والفلـين) أو تنتج عن تأكسد أحماض دهنية سابقة. ويكون لها إذن عـدد مـزدوج مـن ذرات الكربون. وتنتج الجليسريدات glycerides من تركيب حافز جليـسريني glycerol (جليسرين[٤٤] glycerine) مع ١ أو ٢ أو ٣ أحماض دهنية للحصول على أحاديات وثنائيات وثلاثيات الجليسريد. وتوجد الاستيرولات[٤٥] (الشكل ٣) فـي الأغـشية (عوامل تدعيم الصلابة): الكولسترول حيوانى نموذجيًا. وللـ ٢٤ أثيل كولـسترول ethylcholesterol أصل نباتى. ويمكن لهيكلها الكربونى أن يقاوم فـي الأزمنـة الجيولوجية ويمكن تعيينه فى الرواسب بالغة القدم.

الأشكال الجزيئية العيانية

لا يمكن دراسة الأشكال الجزيئية العيانية (الـشحوم المركبـة، وأحمـاض فولفك، والأحماض الدبالية، والمواد الدبالية ذات التعقيد البنيوى المتزايـد) بـشكل مباشر مثل الشحوم البسيطة بسبب تعقدها وعدم ذوبانيتها وتباينها. وتتطلب دراستها البنيوية الدقيقة استخدام تفاعلات تحللية بطريقـة كيميائيـة أو بواسـطة التحلـل الحرارى pyrolyse،[٤٦] وهى أداة تحليلية جديدة فى طور التطوير، وحتى بواسطة طرق إنزيمية. ويجب بعد ذلك إعادة تركيب الوحدات التى تم الحصول عليها بعـد تعيينها لكى يتم إعادة إنشاء البنية الأولية. وتتيح التقنيات المطيافيـة مثـل فـوق البنفسجية، وتحت الحمراء، والرنين المغناطيسى النووى RMN، الدراسة المباشرة لكن المعلومات تكون إجمالية (وليست على المستوى الجزيئى)، مثلاً نسبة الكربون الدهنى aliphatiques، والعطرى... إلخ.

---

(٤٤) جليسرين: سائل لا لون له يذوب فى الماء ويتولد من تصبين المواد الدهنية. (المترجم)

(٤٥) استيرول sterol: مادة كحولية صلبة. (المترجم)

(٤٦) حل حرارى: إخضاع المركبات العضوية لحرارة عالية حتى تتحلل. (المترجم)

C18 acide stéarique

acide oléique

acides gras

C24 HOOC COOH

diacide

C24 HO COOH

ω-hydroxyacide

C24 COOH OH

α-hydroxyacide

cholestérol

24-éthylcholestérol

الشكل (٣)

البنية الكيميائية لبعض المواد الشحمية

وتعتبر الأبحاث فى مجال البنية الدقيقة للأشكال العضوية الجزيئية العيانية حديثة جدا. والنتائج التى تم الحصول عليها حتى الوقت الراهن بفضل تعيين راسمات لأصل مواد مثل الأحماض الدهنية، والحكوليات.. إلخ، تشير إلى وجود تصميمات متنوعة لأصل نباتى أو بكتيرى مختلط فى بنية المواد الدبالية. وعلى وجه الإجمال فإن الدراسات التى أُجريت تشير إلى اختلافات مهمة فى البنية بين الأحماض الدبالية (إسهام كبير خليوزى[٤٧] خطى lingo cellulosique، أصل نباتى) ودبالى (إسهام شحمى مهم، تغيير ميكروبى مهم) الذى يقدم تحليلات بنيوية مثبتة بواسطة شحوم جزيئية عيانية. وتقدم تلك الأخيرة سمة كربونية دهنية واضحة جدا ويبدو أنها تتكون من بوليمرات نباتية أو ميكروبية محفوظة جزئيا، التى يمكن بواسطتها اندماج (بروابط كيميائية) الشحوم البسيطة (طبيعية أو متواجدة

(٤٧) خليوزى: سلولوزى، مكون من السلولوز. (المترجم)

أصلاً allochtones). ومجموع هذه النتائج يؤكد أيضا فرضية ظهرت منذ بضع سنوات عن التتابع:
شحميدات ← أحماض فولفيك ← أحماض دبالية ← دبالي ← فحم، صخور بترولوجية petrologenes.

تحول الكربون العضوى فى التربة
قدرته على "التصفية الذاتية"

يمكن استخدام تقنيات مختلفة لتعيين آليات تغير الكربون العضوى فى التربة: تعديل أحوال وسط ما بتقليل حالات النقص مثلاً، أو إضافة مواد عضوية خالصة أو ممتزجة، بتركيزات ملائمة. ويلى ذلك إجراء تجارب فى أوقات مختلفة فى المختبر فى شروط يتم التحكم فيها: تجرى الحضانة عند ٢٠ أو ٢٤ درجة مئوية خلال شهرين كحد أقصى وبالتوازى مع حقل فى شروط طبيعية. وتُقارن النتائج بتجارب إثباتية مناظرة. وتتيح النمذجة فى المختبر تعجيل العمليات الطبيعية وقياس التمعدن (نسبة الغاز الكربوني المنبعث، بالنسبة إلى العينات الإثباتية).

التحول الحيوى للكربون العضوى

إن إضافة أنواع الصلصال (الطفل) المختلفة، والحديد، والأزوت... إلخ إلى أنواع مجدبة من التربة ناقصة التغذية (تربة حمضية تحت غابة صنوبر ساحلية... إلخ) حيث المادة العضوية تميل إلى التراكم، يحفز النشاط البيولوجى ومن ثم يعجل انقلاب turn - over الكربون العضوى فى تلك الأنواع من التربة الحمضية. وهذه النتائج مهمة بالنسبة لإزالة السموم من التربة المجدبة، الغنية بالشحميدات السامة، والتنفيذ سهل وباهظ التكلفة بعض الشيء. وأشارت دراسة من ناحية أخرى إلى أن الإضافات المتكررة بعناصر N وP وK (أزوت وفسفور وبوتاسيوم) التى تحسن الحراجة (علم الأحراج) فى حرج لا يعرّض على المدى البعيد خصوبة الأرض لخطر ذى مدى طويل. والعمليات الرئيسية لتحول الكربون العضوى هى:

– التمعدن، ومن ثم تحول C العضوى إلى CO_2.

– تحول محدود إلى ثانى أكسيد الكربون bioxydation، مثلاً أكسدة الهيدروكربورات إلى خلونات الميثيل methylcetones، والهيدروكربورات إلى أحماض، وتكون الكحوليات فى هذه العملية بمتوسطات سريعة الزوال، بمدة بقاء ضئيلة جدا.

– تحليل إنزيمى بالماء للجليسريدات glycerides، مما يحرر أحماضًا دهنية وجليسرين glycerol، أو شمعانيات cerides، ويحرر أحماضًا دهنية وكحوليات. وقد يصاحب هذه التفاعلات عمليات أسترة حيوية bioesterifications ولكن مع محفزات مختلفة.

ومن ثم يمكن، فى عدد معين من الحالات، وبتصحيح حالات النقص، تحسين التربة المجدبة وتشجيع انقلاب مادتها العضوية.

استخدام القدرة على "التصفية الذاتية" للتربة

تجرى المحاولة منذ نحو عشرين سنة لاستخدام التربة (بشكل رسمى) لإزالة النفايات شديدة التنوع، أولاً الهيدروكربورات ثم أوحال مركز التصفية، والدهون... إلخ. والمبدأ مثير للاهتمام من الناحية النظرية حيث إنه يتعلق بجلب الكربون العضوى إلى التربة، لكن الدراسات المختلفة تشير إلى أن كل حالة يجب دراستها جديًا إلى أقصى حد. وسوف ندرس حالتين على سبيل المثال.

والحالة الأولى التى تجرى دراستها تتعلق بالهيدروكربورات، وبشكل أكثر خصوصية النفقات الضخمة للصناعة النفطية. والتخلص منها بواسطة التربة (تقنية زراعة الأرض land farming أو زراعة الحمأة)[٤٨] وهى تقنية مثيرة للاهتمام

(٤٨) الحمأة sludge: طين أو وحل أو راسب طينى يغطى الأرض أو يشكل تراكمًا طبيعيًا ورواسب كالتى

جدا من الناحية الاقتصادية، حققت الهدف وتعتبر أيضا غاية لكثير من الأعمال. وعلى سبيل المثال، قامت دارسة سابقة بتتبع مصير قطاع نفطى (الوقود PW3D) فى تربة نشيطة جدا فى جرينو Grignon. وبالتوازى أتاحت نمذجة بالهيدروكربور النقى فى C_{20} (إيكوسان eicosane) وأنواع من التربة توضيح الطرق التفاعلية:

- تأكسد نهائى يعطى الكحول ثم حامض مناظر فى C_{20} الذى يؤدى بعد ذلك بشكل كلاسيكى إلى أحماض أقصر فى C_{18} وC_{16}.. إلخ.

- تفاعل أصلى جدا موجود فى ثلاثة أنواع من التربة هو تكوين الهيدروكربور غير المشبع (إيكوسين eicoscne)، الذى يمكنه التأكسد كما سبق. وإدخال رابطة ثنائية كربون - كربون يعتبر مهمًا بالنسبة للتحلل الحيوى لأنه يمكن أن يتأكسد بسهولة كافية.

ومن المهم ملاحظة أن الإيكوسان ecoosane الداخل ومنتجاته المشتقة تعتبر جزئيًا مثبتة بواسطة صلصال (طفل) التربة. ونلاحظ أيضا أن جزءًا من الأحماض المشتقة لأساس أولى يختلط بالبنية الكيميائية للشحميدات الجزيئية العيانية. وهذا التثبيت قابل للانعكاس بوضوح فى التربة المعنية، وقد يكون أقل بكثير فى وسط مجدب (مشكلة تخلف تلوث ما).

وتشير الدراسة الميدانية إلى أنه بعد ثلاث سنوات يبقى ثلث الكربون الأولى غير شحمى (أكثر قابلية للاستخراج). وحدود تلك التقنية الخاصة بتغذية هيدروكربورات هى جرعات وترددات التصفية epandage (وهى هنا ٤٠ كجم/م٢ أى ٤٠ طن/هكتار) التى يجب تهيئتها لكل تربة إذا كنا نرغب فى تجنب السمية وترحيل عمق الأرض. ويتضمن وجود المعادن الثقيلة (التى لا يمكن أن تتآكل حيويًا) وضع حد أمام هذه الطريقة (مشكلة نجدها بالنسبة للتصفية لوحل مركز التصفية).

تكون على مجرى النهر. (المترجم)

والحالة الثانية المهمة هي تلك الخاصة بالدهون الحيوانية والنباتية وتنتج عن الصناعية الزراعية الغذائية. وأفضل من إنشاء مركز تصفية، يتم نشر التدفقات الدهنية للموقع، بعد المرور فى الهاضم،[٤٩] على رقعة أرض زراعية (بعقود مع الزراع). والحالة التى تجرى دراستها هى الخاصة بمشروع يقع فى وسط الغرب. وقامت التجربة فى الموقع على رفع أراض مختلفة وفى أوقات تصفية مختلفة. وعلى التوازى فإن تغير نموذج دهن، ثلاثى الدهنين[٥٠] tristearine (ثلاثى الجليسريد triglyceride متكون انطلاقًا من الجليسرين glycerol وثلاثة محفزات لحامض دهنى stearique)،[٥١] تم تتبعه فى أحوال تحت المراقبة فى المختبر (فى نفس أنواع التربة). ونلاحظ أن التحليل السريع بالماء لثلاثى الدهنين، والحامض الدهنى C_{18} المتكون تحول بسرعة، كما فى الحالة السابقة، إلى أحماض أقصر C_{16} وC_{14}... إلخ. ولا يمتزج الحامض الدهنى بسرعة ببنية الشحميدات الجزيئية العيانية، أكثر بطئًا من نظيره لدى الأحماض الدبالية والدبال.

وتم إثبات كل هذه النتائج بواسطة التجريب فى الحقل. ونسبة المادة العضوية تتزايد بشكل ملحوظ عند التصفية وتقل بعد ذلك قليلاً عندما تتوقف تلك الأخيرة. وأحد النتائج المهمة للتصفية أن هذه الزيادة يصحبها نمو ملحوظ فى نسبة الركام المستقر فى هذه الأنواع من التربة التى تكون هشة فى البداية وذات بنية ضعيفة (الشكل ٤). فإذا أضفنا على التصفية طورًا مائيًا يزيد عوائد زراعة ذرة صفراء بنسبة ٤٠ فى المائة، يكون لدينا هنا تقنية أكثر أهمية من معالجة مركز التصفية، والمعادن الصلبة تكون غائبة تمامًا.

---

(٤٩) هاضم digesteur: أو ميضمة وهى آلة لاستخراج الأجزاء المتحللة من المواد بواسطة الحرارة. (المترجم)

(٥٠) الدهنين stearine: مادة دهنية تستخرج من شحم الحيوانات لا سيما شحم الأمعاء. (المترجم)

(٥١) حامض دهنى: هو حامض أحادى القاعدية يوجد متحدا مع الجليسرين فى الزيوت والدهون، ولا يذوب فى الماء ويذوب فى الكحول والأثير. (المترجم)

إذن تتم إعادة تدوير المادة العضوية ولا تساهم في مخزون الأوحال المترسبة. وهذه التقنية مهمة بالنسبة لإدارة الماء بمقدار أهميتها بالنسبة لتقنية النفايات العضوية وإصلاح أنواع التربة. والمشكلة الوحيدة هي إدارة التدفقات، والتي تكون كثيرة الشيوع في الشتاء بالنسبة للزارعين لكنها غير كافية إلى حد بعيد في الصيف.

	Témoin	Sol épandu
Sol GOV	5,1 ± 0,1	21,4 ± 0,7
Sol DOU	6,4 ± 0,4	13,3 ± 0,3

الشكل (٤)

تغيرات نسبة الركام المستقر لتربتين تحت (الملاحظة)

وبعد تصفية (أنواع التربة منتشرة) التدفقات الدهنية.

وكملخص فإن التربة هي وسط أساسي للكائنات الحية. وينبغي أن نعرف بشكل أفضل مستودعات المادة العضوية التي تحتوي عليها وتحولاتها حتى نصل إلى معرفة أفضل بالعمليات الوظيفية، ونحافظ عليها بشكل أفضل ولا نعرض نوعيتها للخطر على المدى القصير أو المتوسط أو الطويل.

مراجع:

- JUPIN (H.), *Le Cycle du carbone*, Hachette, 1996, 160 p.
- DUCHAUFOUR (Ph.), *Pédologie*, Masson, 1995, 324 p.

تحديد موضع جزئ وتعيين هويته[٥٢]

بقلم: باتريك شاكوين
Patrick CHAQUIN

ترجمة: عزت عامر

من الأنشطة الأساسية للبحث فى الكيمياء الجزيئية اكتشاف أو تخليق جزيئات جديدة، يمكنها أن تحتل مكانها فى الأدوية، والأغذية، ومواد التجميل... إلخ. ومن ثم فليس أقل أهمية تحديد هوياتها ووصفها بأكبر دقة ممكنة. ومن جانب آخر، فإن رغبتنا فى المعرفة تدفعنا إلى معرفة الجزيئات المحيطة بنا، جزيئات بيئتنا الأقرب إلينا من تخوم الكون. وفى النهاية فإننا نحتاج إلى كشف وتحديد هوية الأسماك، والتنينات، والمنبهات..إلخ.

ونادرًا ما تطرح مشكلة التموضع عندما يعد القائم بالتجارب عينة الدراسة. لكن من الممكن أيضا اكتشاف وجود جزيئات فى جهات صعبة المنال، مثل الأغلفة الجوية الكوكبية أو فضاء ما بين النجوم.

ويحتاج تعيين هوية جزئ معرفة طبيعة وعدد الذرات التى يتكون منها، "صيغته الخام"، وقد يكفى ذلك فى حالة الجزيئات الصغيرة: وحده الأوزون الذى له كصيغة خام O_3. وبالمقابل فإن بضع عشرات من الجزيئات تلبى طلب الصيغة الخام $C_4H_8O_2$. غير أن تسلسل الذرات المعطى، "الصيغة شبه النامية - semi developpee" CH3 - (CO) - O - CH2CH3 يحدد دون لبس هوية خلات الأثيل، المذيب الذى يعطى رائحته المميزة للمذيبات من الورنيش إلى الأظافر. لكن هناك جزيئات مختلفة لها نفس الصيغة شبه النامية، هكذا الكارفون (−) carvone (رائحة عطرية للنعناع الأخضر) والكارفون (+) (رائحة الكمون) يعتبر كل منهما،

---

(٥٢)نص المحاضرة رقم ٢٣٥ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٢ أغسطس ٢٠٠٠.

مثل يدينا، صورة من الآخر فى المرآة. ويحتاج تحديد الهوية حينئذ معرفة الموضع النسبى للذرات فى المكان أو "المجسم الكيميائى stereochimie" للجزئ.

وعندما نكون أمام وجود مركب مجهول، علينا قبل أى شىء أن نتساءل ما إذا لم يكن قد عُرف سابقًا وتم وصفه. وسنبحث فى الكتابات وفى بنوك المعلومات حول ما إذا كان قد ذكر فيها جزئ له نفس الخصائص. هذا النهج يمت بصلة للمحقق الذى يبحث فى خزانة جذاذات الشرطة عن بصمات مطابقة لتلك التى تم الكشف عنها فى مكان الجريمة، وهو بحث يمكن جعله آليًا فى الكيمياء مثلها مثل علم الإجرام. وإذا أخفق هذا المسعى، قد يلزم إعادة تشكيل البنية الجزيئية بالتجميع، مثل قطع لغز الصور المتفرقة puzzle، ويتم الحصول على الدلالات المتشظية بواسطة مناهج بحث مختلفة.

مجئ الطيفية فى الكيمياء

لقد تغيرت تلك المناهج البحثية إلى حد بعيد منذ بضع عشرات السنوات. فإذا فتحنا مجلة عن الكيمياء فى بداية القرن، سوف نرى أن الجزئ الجديد كان يتم تعيين هويته بشكل أساسى بطريقة الاختبارات الكيميائية، وهى تفاعلات ذات نتائج يمكن ملاحظتها بالنظر، بواسطة منتج ذى ألوان، وبملاحظات يمكن تصفيتها ومن خلالها يتم تحديد درجة حرارة الاندماج. وتدوينات التركيب المميز (السائل "غير مستقر"، "زيتى") كانت شائعة، ولم يكن من النادر وجود تلك الخاصة بالروائح. وتم اكتشاف القدرة على التحلية للسكرين فى ١٨٧٩، فى زمن كان يتم فيه التذوق بشكل منتظم لكل منتج جديد. واختفى كل ذلك من الكتابات المعاصرة، حيث تتميز الجزئيات بشكل عام بمعطيات رقمية تترجم ما يطلق عليه "أطياف spectres".

والطيف عبارة عن رسم يوضح بالنظر رد فعل جزئ على إثارة فيزيائية، تشتمل على شحنة طاقة. والطرق الطيفية التى سنذكرها هنا هى "الطيفية فوق البنفسجية UV المرئية" أو "الطيفية الإلكترونية"، "الطيفية تحت الحمراء IR" أو

"طيفية الاهتزاز"، "طيفيـــة الموجـــات المجهريـــة micro - ondes" أو "الطيفيـــة الدورانية" ثم "الرنين المغناطيسى النووى" RMN. وتتضمن تلك الطـــرق عمومًـــا تطبيق تفاعل للجزئ مع موجة كهرومغناطيسية. وسوف نقدم أخيرًا فـــى النهايـــة "طيفية الكتلة" SM.

ولنتذكر أن الموجة الكهرومغناطيـــسية OEM تتكـــون بـــالتغير الـــدورى والمتزامن لمجال كهربائى ومجال مغناطيسى. وأحد تلك الخواص هو طول الموجة λ حيث يتم التعبير عن ترددها v بالهيرتز Hz، وترتبط بالعلاقة $v = c/ \lambda$. (c هى سرعة الضوء: 3.10^8 m/s ٣x١٠^٨ متر / ثانية). ويصاحب كل طريقـــة طيفيـــة نطاق من أطوال الموجات. وتقوم الأولى على الضوء المرئى، حيث يصل طـــول الموجة إلى ٤٠٠ نانومتر (١ نانومتر = ١٠^-٩ متر) وبالنسبة للـــضوء البنفـــسجى يتراوح بين ٤٠٠ و ٢٠٠ نانو متر تقريبا، وتقع الثانية بين تحت الحمـــراء بطـــول موجة بمقدار ميكرون، والثالثة فى الموجات المجهرية حيث طول الموجة بمقـــدار سنتيمتر، والأخيرة تقع فى الموجات الراديوية بطول يـــصل إلـــى متـــر، ويتميـــز النطاقان الأخيران غالبا بترددهما بالجيجا هرتز GHZ (١٠^٩ هيرتز) وميجا هرتز (١٠^٦ هرتز) على التوالى.

ويمكن دراسة التفاعل بين موجة كهرومغناطيسية وجزئ بفضل "امتصاص الطيف" لدى الجزئ. ويعتبر مصدر الإشعاع الكهرومغناطيسى بطول موجة معطى قابلاً للتعديل، بتوجيه حزمة على العينة. ويعين جهاز الكشف، فى مخرج العينة، ما إذا كان امتصاص الموجة أكثر أو أقل. ويسجل الطيف الذى يتم الحـــصول عليـــه على الإحداثى الرأسى قيمة مميزة للامتصاص وإلى الإحداثى الأفقى طول الموجة (أو تردد) الموجة الكهرومغناطيسية. ويشير ظهور عمود أو شريط فى أحد أطوال الموجة λ إلى أن الإشعاع المناظر تم امتصاصه.

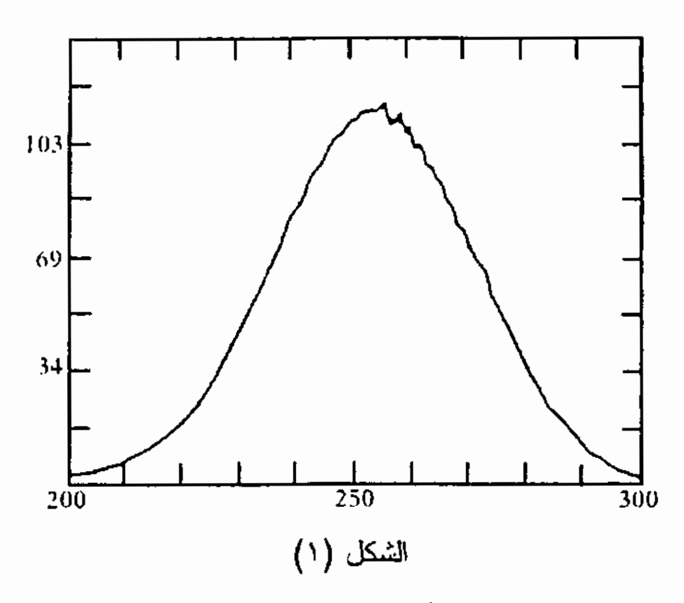
ويناظر الامتصاص انتقالاً للجزئ من كمية طاقة كهرومغناطيسية معينـــة. وعلى المستوى الجزيئى تعتبر الطاقة "مكمّاة quantifiee"، مما يعنى أنه لا يمكـــن

تغييرها إلا بـــ "الرزم"، كميات لا تنقسم، أو "كم quanta" طاقة $\Delta E = hv$ حيث h هى ثابت بلانك Plank.

الطيفية فوق البنفسجية المرئية
أو الطيفية الإلكترونية

يوضح الشكل ١ المنطقة الرئيسية لامتصاص الأوزون فى نطـــاق الأشـــعة فوق البنفسجية المرئية. ونرى أن فوق البنفسجية يتم امتصاصها بشدة، من هنا دور الحامى الذى تلعبه "طبقة الأوزون" فى الغلاف الجوى العلوى. ويقوم كـــم الطاقـــة الذى يُمتص هنا بزيادة طاقة إلكترون فى الجزئ ينتقل من مستوى كان يحتل فيـــه موضعًا مكانيًّا محددًا (يناظر "وظيفته الموجية") إلى مستوى آخـــر، ذى تموضـــع مختلف، من هنا يأتى اسم "الطيفية الإلكترونية". ومقدار تلك الطاقة هـــو الخـــاص بالروابط الكيميائية تلك التى توضح التأثير الهدام للأشعة فوق البنفـــسجية، القـــادرة على تقويض الجزيئات البيولوجية.

ويمكن لتلك الأطياف الفوق بنفسجية المرئية أن تكون كافية لتحديـــد هويـــة الجزيئات الصغيرة مثل الملوثـــات NO_2 وSO_2 وO_3 وبعـــض الهيـــدروكربورات العطرية. ومع ذلك فإن المعلومات التى تتضمنها غير كافية لتحديد هويـــة كاملـــة للجزيئات قليلة التعقيد.

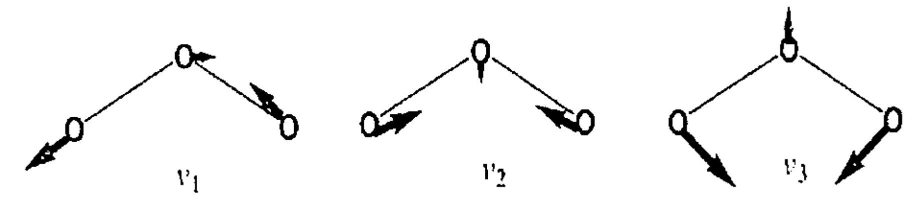


الشكل (١)

طيف امتصاص الأوزون فى الأشعة فوق البنفسجية بين ٢٠٠ و ٣٠٠ نانومتر.

طيفية تحت الحمراء
أو طيفية الاهتزاز

يناظر نطاق الأشعة تحت الحمراء المستخدم فى الكيمياء أطوال موجات تتراوح بين ٢ و ٢٠ ميكرومتر. وعندما يتم امتصاص هذه الإشعاعات بواسطة الجزئ، تتحول إلى "طاقة اهتزاز". فلنوضح هذه الفكرة مع جزئ الأوزون. لدى الأوزون خواص هندسية محددة جدا ويمكن تعيينها بكثير من الدقة: المسافة بين النوى والذرات (١,٢١٨ أنجستروم) وزاوية الروابط (١١٦,٨ درجة). لكنه لا يتعلق إلا بقيم متوسطة. فلو أمكن ملاحظة هذا الجزئ، فسوف يبدو لنا كما لو كان نشطًا بحركات تشوهات للمكان المضطرب، لكنه يستطيع أن يتفكك إلى ثلاث حركات دورية (أو "أنماط اهتزاز") بسيطة نسبيًا موضحة فى الشكل ٢. كل منها تتحقق فى تردد محدد جدا v_1 وv_2 وv_3. ويمكن للجزئ أن يمتص موجة كهرومغناطيسية لها إحدى هذه الترددات v: ويتلقى الطاقة المناظرة ΔE التى تتحول إلى طاقة ميكانيكية مع زيادة سعة هذه الحركة.



الشكل (٢)

الحركات الثلاث للتشوه الدورى للأوزون.

ويقدم الجزئ المحتوى على N ذرة 6 - 3N نمطًا للاهتزاز. وبسرعة يصبح من الصعب مصاحبة كل شريط من الاهتزازات المناظرة، لكن يمكن معرفة، حتى فى الجزيئات الأكثر تعقيدًا، ترددات مميزة لأزواج أو تجمعات ذرات مرتبط فيما بينها.

وعلى هذا النحو فى طيف خلات الأثيل acetate d`ethyle (شكل ٣) الذى يتضمن ٣٦ نمطًا للاهتزاز، يكون الشريط عند ٥,٧٥ ميكرون (الميكرون μ ١٠⁻٦ أمتار) متميزًا بامتداد دورى للرابطة C = O لخاصية أستر aster، مؤكدًا بشريط عند ٨,٠٥ ميكرون باهتزاز C - O: ويناظر الشريط عند 7.3ميكرون تغيرًا فى شكل مجموع ميثيل CH_3. وعند ٣,٣٠ ميكرون نتعرف على اهتزازات روابط C - H. وتظهر إفادات سلبية مهمة أيضا، مثل غياب خاصية الكحول أو الحمض (الرابطة OH) فى منطقة ٣ ميكرون.

كذلك يمكن إزاحة جزء من التعقد حتى فى هذه الأطياف بأهداف تحديد الهوية بواسطة جزئ معروف مسبقًا. والمنطقة من ٦ إلى ١٢ ميكرون تتضمن بشكل خاص "بصمة رقمية" حقيقية للجزئ.

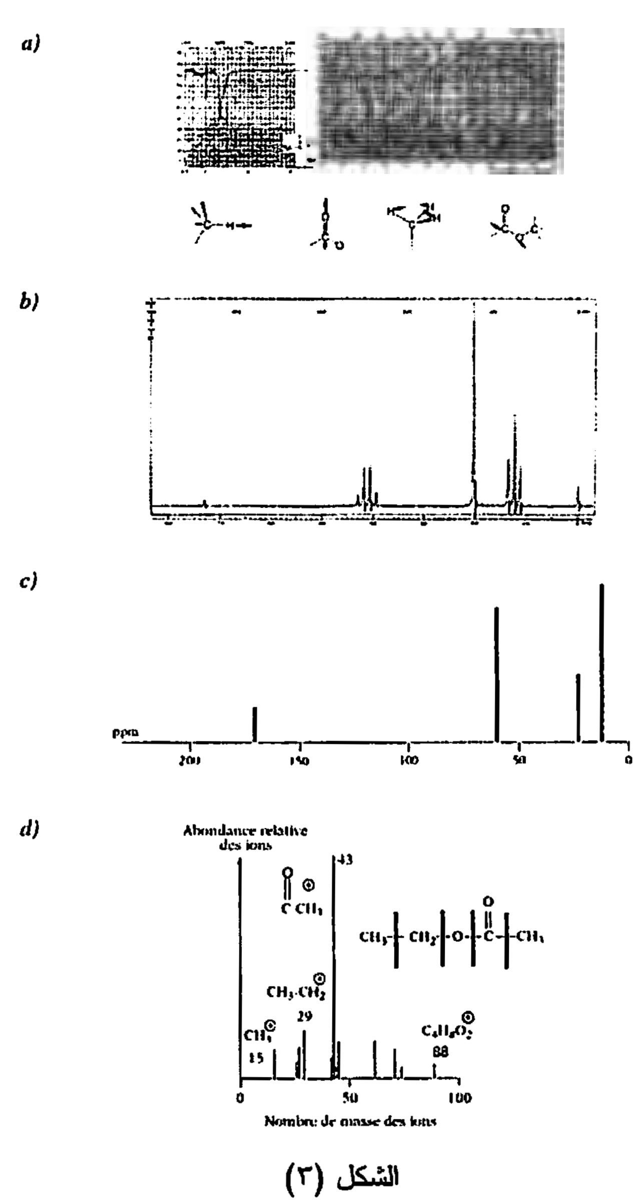
الإشعاعات القادمة من الفضاء

يمكن كشف الترددات المميزة لبعض الجزيئات فى مناطق غير متاحة لنا مثل الأغلفة الجوية الكوكبية أو فضاء ما بين النجوم. يتعلق الأمر حينئذ فى أغلب الأحيان بإشعاعات منبعثة وليست ممتصة.

وفى الواقع فإن ظاهرة امتصاص موجة كهرومغناطيسية يمكن أن تكون قابلة للانعكاس: إذا تعرض جزئ لاستثارة أولية حملته إلى مستوى طاقة أعلى، يمكنه أن يرد هذه الطاقة ΔE على هيئة إشعاع ذى تردد v بحيث يكون $\Delta E = hv$.

ويوضح الشكل ٤ إشعاعات تحت حمراء منبعثة بواسطة الغلاف الجوى للكوكب تيتان Titan (قمر زحل)، تم تسجيلها بواسطة المسبار IRIS. وتظهر أعمدة مميزة لعدد معين من الجزيئات، تتكون بشكل أساسى من عناصر C و H و N. وتأتى الفائدة المثيرة لهذا الكوكب من حقيقة أن غلافه الجوى متوقع له أن يشبه إلى حد ما غلاف الأرض، قبل ظهور الأكسجين تحت تأثير خاصية اليخضورية chlorophyllienne النباتية.

ونادرًا ما تُستخدم منطقة الموجات المجهرية فى الكيمياء الأرضية. غير أنها ثمينة بالنسبة لتحديد هوية جزيئات فضاء ما بين النجوم. وذلك هو نطاق ما يطلق عليه "طاقة دوران" الجزيئات. وبالإضافة إلى تغير شكلها الذى سبق ذكره فإن الجزيئات نشيطة بحركات دوران يمكن تقسيمها إلى ثلاثة دورانات حول ثلاثة محاور. ويصاحب كل من هذه الدورانات تردد مميز لكل جزئ، وامتصاص موجة



الشكل (٣)

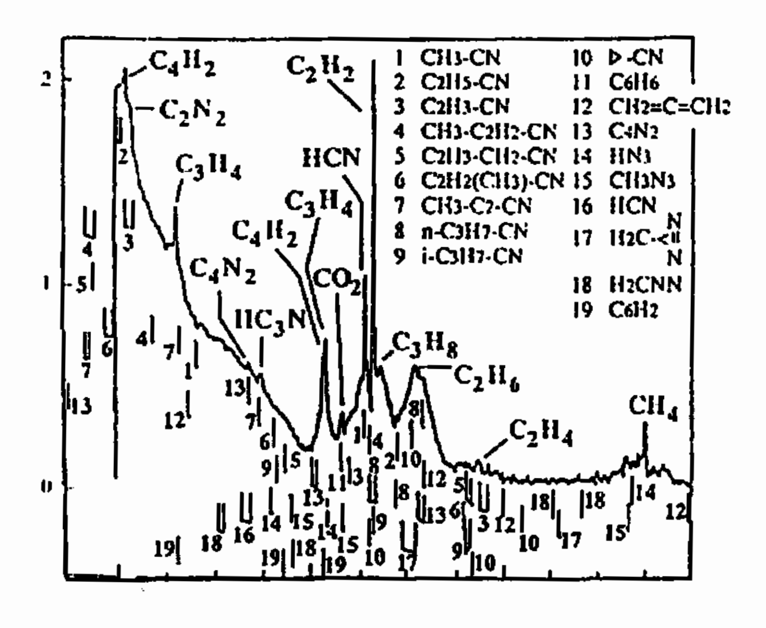
أربع أطياف لخلات الأثيل: من أعلى إلى أسفل:

طيف تحت الحمراء وتسجيل لبعض الاهتزازات المميزة.

(ملحوظة، يزداد الامتصاص هنا)، ب) طيف الرنين المغناطيسي النووى للهيدروجين بجهاز يعمل على ٦٠ ميجا هارتز، ج) طيف رنين مغناطيسي نووى لكربون، د) طيف كتلة.

كهرومغناطيسية بنفس التردد يكون تأثيره زيـادة فـى الطاقـة الحركيـة للدوران. وبالعكس فإن الجزئ يمكن أن يفقد جزء من طاقته الدورانيـة بانبعـاث إشعاع منه.

ويوضح الشكل ٥ انبعاث موجات مجهرية، بنحو ٢٠٠ جيجا هارتز، لمنطقة فى الفضاء، هى السحب الجزيئية للجوزاء Orion، تشير إلى وجود ثـانى أكـسيد الكبريـت SO_2، وأول أكـسيد الكربـون CO، والميثـانى methanal (CH_2O) والميثانول methanol (CH_3OH)... إلخ، وكذلك أنواع كثيرة أخرى لـم تتحـدد هوياتها بعد، حيث أن - دون شك - بعضها مجهول على الأرض.



الشكل (٤)

انبعاث أشعة تحت الحمراء من الغلاف الجوى لتيتان Titan

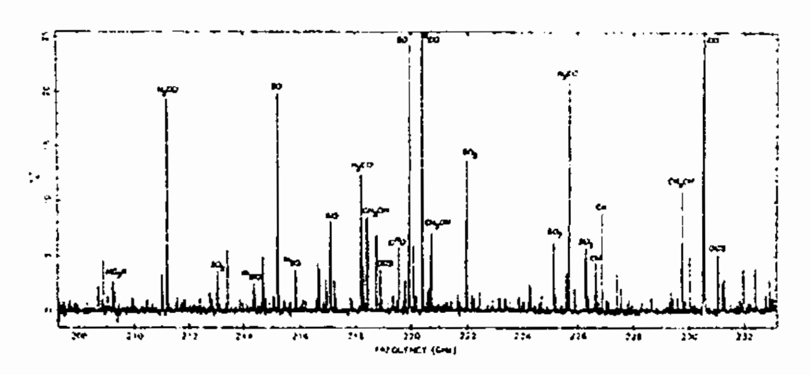
(F. Roulin et coll. Adv. Space Res. 12 «11» 181, 1992)

نُسخ بإذن من Elsevier Science Ltd.. Kidlington (GB)

وثيقة مأخوذة من م. س. جازو M. C. Gazeau وج. بنيلان J. Benilan.

الرنين المغناطيسى النووى

ظهر الرنين المغناطيسى النووى RMA نحو عام ١٩٦٠ فـــى المختبـــرات الكيميائية وغرف عنه منذ التطورات المستمرة أنه يمثل دون شك طريقـــة أقـــوى لتحديد هوية البنى الجزيئية.



الشكل (٥)

انبعاث الموجات المجهرية من مصدر سحب

جزيئية للجوزاء Orion (مأخوذة بإذن من المؤلفين

A. Blake et coll. Astrophys. J., 315, 621 (1987)

تم الحصول على الوثيقة من أ. باريسيل O. Parisel)

أساس الطريقة

كما يوضح اسمها، فإن طريقة RMA قائمة علـــى خاصـــية "مغناطيـــسية" لبعض "النوى" الذرية، مثل تلك الخاصة بالهيدروجين ا (^{1}H)، البروتـــون. ولـــدى هذه النواة "لف" ليس منعدمًا مما يؤكد لها "عزمًا مغناطيسيًا". وهذا يعنى أنها تسلك مثل مغناطيس مصغر وتقدم من ثم تشابهات معينة مع الإبرة المغناطيسية لبوصلة. وهذه البوصلة، المتعرضة لمجال مغناطيسى، المجال المغناطيسى للأرض مـــثلاً، تتوجه فى اتجاه هذا المجال. وإذا أُزيح عن متموضعة المتـــوازن، فإنـــه يتـــأرجح بتردد يعتمد فى الوقت نفسه على خواصه الذاتية (مغناطيسيته، وشكله، وكتلتـــه...)

وشدة المجال المغناطيسى الواقع عليه. وهذا ما يحدث بالنسبة للعزوم المغناطيسية النووية التى تتخذ، فى مجال مغناطيسى B، حركة دورية ترسم شكلاً مخروطيًّا حول العمودى precession ذات تردد v متناسبة مع $B : v = (1/2\pi)\ \gamma\ B$ (يعتمد الثابت γ على طبيعة النواة: بروتون، ^{13}C و^{19}F... إلخ). وتستطيع هذه العزوم المغناطيسية حينئذ امتصاص موجة كهرومغناطيسية ذات تردد v تتحول الطاقة فيها إلى طاقة مغناطيسية. وفى أجهزة الموجة الكهرومغناطيسية يكون المجال B أكثر كثافة بمئات المرات من المجال الأرضى. وظهرت الأجهزة الأولى بشكل روتينى فى ستينيات القرن العشرين، واستخدمت مجال ١,٤١ تيسلا[٥٣] Tesla، تقريبًا كانت تتم به ملاحظة البروتون عند ٦٠ ميجا هرتز.

الإزاحة الكيميائية والمزاوجة لف - لف

أول ظاهرة تسمح بالحصول بواسطة الرنين المغناطيسى النووى على إفادات عن البنية الجزيئية هى "الإزاحة الكيميائية deplacement chimique". عندما يتعرض جزئ إلى مجال مغناطيسى فإن إلكتروناته تتفاعل لتشكل محليًّا مجالات مغناطيسية مشوشة. وإذا كان لدى نواتين ذريتين لهذا الجزئ بيئات جزيئية مختلفة، فإنها تتعرض لمجالات مشوشة مختلفة ولا يحدث لها من ثم رنين عند نفس التردد تمامًا، وهذه هى "الإزاحة الكيميائية". ونحصل على طيف رنين مغناطيسى نووى، تبعًا للتقنية بواسطة "موجة متصلة"، عندما نقوم بتغيير تردد الموجة الكهرومغناطيسية بشكل متزايد وعند الكشف على امتصاصها. ويكون تغير المجال المغناطيسى لنقطة جزئ ما إلى أخرى ضئيلا نسبيًا، بمقدار بضعة أجزاء من المليون من المجال الكلى، ولهذا يتم التعبير بـ ppm عن "أجزاء من مليون".

ويوضح الشكل ٣ طيف الرنين المغناطيسى النووى لبروتون خلات الأثيل acetate d`ethyle: نلاحظ فيه ثلاث إشارات تناظر ثلاثة مواقع محتلة بواسطة

---

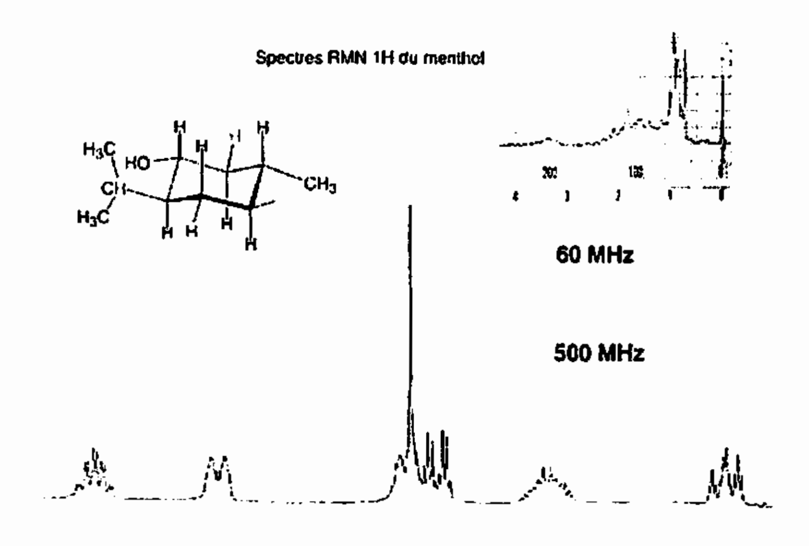
(٥٣) تيسلا: وحدة الحث المغنطيسى. (المترجم)

هيدروجينات، مع إزاحة كيميائية متميزة لبيئتها، مثلا CH_3 واحد مرتبط بـــ CO واحد بنحو ٢ جزء من مليون... إلخ. ونلاحظ من جانب آخر أن إشارتين تـشكلتا من مجموعة من عدة أعمدة بشكل متميز، وتمثل علـى التـوالي ثلاثـة وأربعـة مركبات. تلك هى ظاهرة "المزاوجة لف – لـف couplage spin - spin" وتُفسر بتأثير بروتونات مجموعة مجاورة والـ CH_3 الواقع بجانب CH_2 (جاران) يعطى 3 = 1 + 2 إشـارة. وبالعكس فإن CH_2 الواقع بجانب CH3 (ثلاثة جيران) يعطى 4 = 1 + 3 إشارة. ومجموعـة هـذه الإشـارات تتميـز بتجمـع إثيـل ethyle (CH_2CH_3). ونلاحظ أن CH_3 الآخر، الذى ليس له بروتونات مجـاورة، يظـل تحت شكل عمود منفرد.

تطورات حديثة فى الرنين المغناطيسى النووى

تم تحسين هذه الطريقة بالتدريج، من أحد الجوانب عن طريق إنشاء أجهـزة مجالات مغناطيسية أكثر فأكثر ارتفاعًا، ومن جانب آخر عن طريق تطوير "تقنيات بواسطة الدفع".

وكما رأينا فإن هناك تناسبًا بين تردد الـرنين والمجـال المـستعمل. وقـد تجاوزنا بالتدريج الأجهزة التى يحدث للبروتون فيها رنين عند ٦٠ ميجا هرتز إلى الأجهزة التجارية الأخيرة التى تعمل عند ٨٠٠ ميجا هرتز، وهو ما يناظر مجـالاً مغناطيسيًا يقترب من ٢٠ تسلا (أكبر مليون مرة من المجـال الأرضـى). ومـن الصعب الحصول على مجالات مغناطيسية بهذه الشدة، والتى يجب أن تكون مـن جانب آخر ذات تجانس فى المكان المشغول بالعينة وذات اتزان خـلال الـزمن. ويحتاج ذلك إلى استخدام مغناطيسات كهربائية electroaimants بملفات من مـواد فائقة التوصيل، وعند درجة حرارة هليوم سائل، للحصول علـى تيـارات بالـشدة المطلوبة. وتظهر فائدة أجهزة المجالات المغناطيسية المرتفعة إذا قارنا فى (الشكل ٦) أطياف المَنتول mentol عند ٦٠ ميجا هرتز وعند ٥٠٠ ميجا هرتز فى منطقة من ١ إلى ٢ جزء من مليون:



الشكل (٦)

أطياف الرنين المغناطيسى النووى لهيدروجين المنتول. مُسجلة
أعلى بجهاز يعمل عند ٦٠ ميجا هرتز، وفى المنطقة السفلية
من ١ إلى ٢ جزء من مليون مسجلة عند ٥٠٠ ميجا هرتز
(تم الحصول على الوثيقتين فى شكلى ٦ و٨ عن طريق
ن. جوسدويه N. Goasdoue وج. س. بيلوى J. C. Belloeil)

– فى الأول تراكبت الإشارات لتعطى "كتلة" من الصعب استغلالها.

– وفى الثانى كل بروتون منفرد تمامًا، ونرى بوضوح العناصر المتماثلة المميزة للتزاوج الذى يتيح مساهمة ميسورة بما فيه الكفاية من كل الإشارات.

والتطور الآخر الحاسم كان تطوير الرنين المغناطيسى النووى بالدفع RMN par impulsion المغناطيسى القصير والشديد، وتقدم كل العزوم المغناطيسية حركة تذبذبية، وكل منها له تردده الخاص، الذى يهمد بسرعة. حينئذ "تُبث" الإشارة المركبة بواسطة مجموعة هذه العزوم المرتدة، بعد فك رموز معلوماتية، نفس معلومات طيف "كلاسيكى" بالموجة المتصلة ولكن فى زمن أقصر بنحو ١٠٠ مرة.

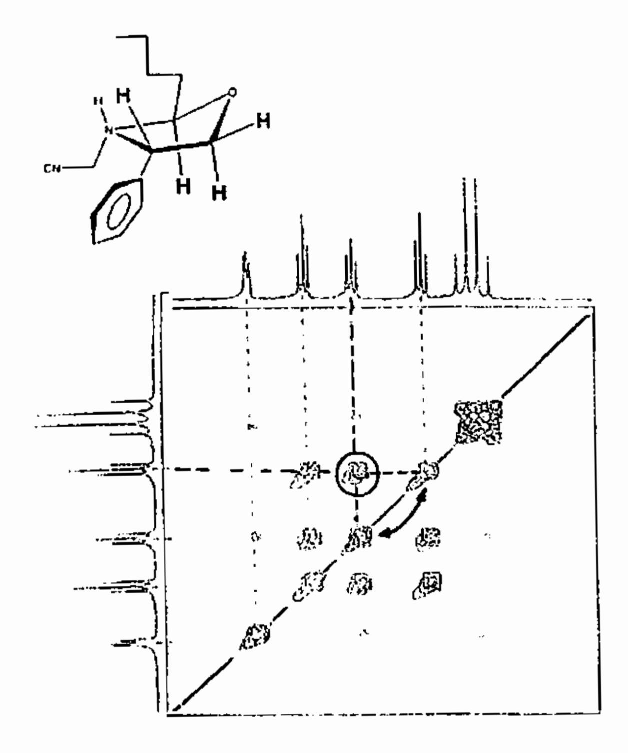
وأتاح ذلك تطوير رنين مغناطيسى نووى للكربون، وهو ما يخص كل الكيمياء العضوية. ويتكون الكربون الطبيعى فى الواقع بشكل أساسى من النظير ١٢، وللنواة فيه لف منعدم ومن ثم لا تعطى رنينًا مغناطيسيًا نوويًا، ولا تحوى سوى على ١,١ فى المائة من الكربون ١٣ (^{13}C) الذى له لف لكنه لا يعطى سوى إشارة ضئيلة جدا. ويتيح الرنين المغناطيسى النووى بالدفع تراكم إشارات فى ذاكرة قبل معالجتها، ومن ثم الحصول فى وقت ملائم على طيف ^{13}C، الذى يمثل أيضا ظاهرة الإزاحة الكيميائية فى مجموعة مقدارها ٢٥٠ جزءًا من مليون. ويوضح طيف خلات الأثيل (الشكل ٣) وجود أربعة أنواع كربون فى بيئات كيميائية مختلفة.

الرنين المغناطيسى النووى فى بعدين

يتيح التزاوج لف – لف إقامة ترابط لبعض التجميعات، وعمليا يوضح لنا أن بروتونين متزاوجين فيما بينهما تفصلهما ثلاث أو أربع روابط كيميائية فى أقصى حد. ولكن قد يكون من العسير، فى طيف مركب، تحديد أى هويات تزاوج لإشارات هى المرتبطة بهذا التفاعل. ويجيب الرنين المغناطيسى النووى فى البعدين ضمن طرق أخرى على هذا السؤال. وتقوم تقنيته على استخدام تتاليات دفعات مغناطيسية ذات مدد وفترات زمنية مختارة بشكل مناسب، يتم التحكم فيها بواسطة المعلوماتية. والطيف كوسى COSY (مطيافية ذات علاقة متبادلة أو مطيافية ترابطية) المنتسب إلى التزاوجات بين البروتونات موجود فى (الشكل ٧). والمحور الأفقى والرأسى هما ترددا الطيف الكلاسيكى 1D، الطيف الموجود على قطر المربع. ووجود إشارة خارج هذا القطر (مثل تلك التى تكون محاطة) فى المحورين الرأسين v_1 وv_2، يعنى أن اللفين اللذين يحدث لهما رنين عند هذين الرنينين يكونان متزاوجين (يُشار إليهما بالسهم ذى الرأسين).

ويمكن إنشاء نوع آخر من الارتباطات بواسطة الرنين المغناطيسي النووى فى البعدين. و"ظاهرة أوفرهوسير Overhauser النووية" هى ظاهرة تعتمد على مسافة نواتين وتُظهر تقاربهما "المكاني"، مستقلاً عن عدد الروابط الكيميائية التى تفصل بينهما. ومع دراسة أطياف نوسى NOESY فى البعدين، فإنها تتيح دراسة الخواص البنيوية الأساسية للجزيئات البيولوجية. وتقدم الجزيئات مرونة معينة وهى معرضة لتغير فى الشكل للتكيف مع بعض الأشكال التى يطلق عليها "تشكلية conformations" بحركات التواء حول الروابط البسيطة. وتعتمد الخصائص البيولوجية بدقة على التشكلية التى تبنيها. وهكذا فإن مرض "جنون البقر Vache foll" لا ينتج إلا عن تغير فى التشكلية، تحت تأثير "جسيم فى غير محله prion" فى بعض البروتينات، دون أى تبديل حقيقى فى طبيعتها الكيميائية.

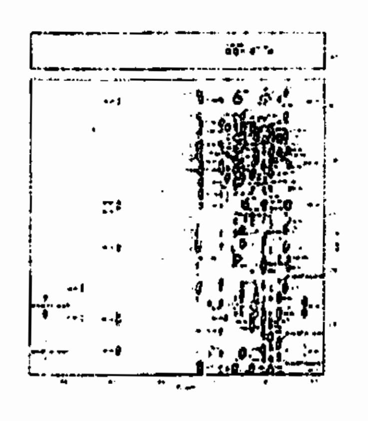
وتتضمن "النمذجة الجزيئية تحت قيد طيفى" حسابًا بمساعدة برنامج معلوماتى للمواضع النسبية للذرات، مع الأخذ فى الاعتبار لنوعين من المعطيات. فمن جانب هناك برنامج "ميكانيكا جزيئية"، يدمج تغيرات الطاقة المرتبطة بكل تشكلية للجزئ (تغير أطوال الروابط، زوايا التكافؤ... إلخ)، وتعيين تشكلات الجزئ الأكثر استقرارًا.



الشكل (٧)

طيف كوسى COSY الجزئى لجزئ موضح أعلاه.

ومن جانب آخر تتيح علاقات التقارب لبعض تزاوجات الـذرات المعطـاة بواسطة الطيف القيام بعملية اختيار ما بين الاحتمالات السابقة. ويوضح الـشكل ٨ (على اليسار) طيفًا نوسيا NOESY جزئيا لبروتين موجود فى اللبن، هو الوعـانى البقرى angiogenine bovine، مع بعض إشارات يوضـح كـل منهـا التقـارب المكانى الأكبر أو الأقل لبروتونين تُقرأ إزاحتيهما الكيميائيتين على التـالى علـى الإحداثين الأفقى والرأسى. ويمثل الجزء الأيمن نتيجة النمذجة، حيث تمثل الآثـار المختلفة عدم يقين معين، يكون ضئيلاً فى الأجزاء المركزية، وأكثر أهميـة علـى طرف السلاسل.





الشكل (٨)

طيف نوسى NOESY الجزئى لنمذجة تحت قيد مطيافى للوعائى البقرى.

(Lequin et coll. Biochemistry 35 (1996), 8870)

القياس الطيفى للكتلة

عرض الطريقة

يعتبر القياس الطيفـــى spectrometrie للكتلـــة (SM) spectrometrie de mass مع RMN هو الطريقة التى شهدت حديثًا تطورات مثيرة للدهشة. وسنكتفى بأن نقدم الأساس الذى قامت عليه ونذكر بعض التطبيقات.

تتكون الإثارة التى يتعرض لها جزئ M هنا من نقل طاقة كافية لأن ينتزع إلكترونًا، ليصبح "الأيون الجزيئى" M^+. وتتضمن الطريقة الأكثر كلاسيكية قصف الجزئ، الذى يتم تبخيره أولاً، بحزمة إلكترونات e^- تم تعجيلها بجهد يـــصل إلـــى بضع عشرات الفولتات:

$$M + e^- \longrightarrow M^+ + 2e^-$$

ويمكن لهذه الطاقة أن تؤدى إلى انشقاق بعض الجزيئات فى نقاط مختلفـــة، لتعطى شظايا يكون بعضها متعادلاً ولا يُكتشف، ويحافظ الآخـــر علـــى الـــشحنة الموجبة. وتتضمن المرحلة التالية تحديد كتلة الشظايا المشحونة المختلفة.

ويمثل طيف الكتلة على الإحداثى الأفقى عدد كتلة الأيونات وعلى الإحداثى الرأسى وفرتها النسبية، كنسبة مئوية من الأيون الأكثر وفرة. ولكى نأخذ مثالاً خلات الأثيل acetate d`ethyle (الشكل ٣)، نلاحظ على عدد الكتلة ٨٨ الأيون الجزيئى $C_4H_8O_2^+$. ويناظر الأيون الأكثر وفرة الشظية $COCH_3^+$، ونلاحظ أيونين CH_3^+ و $C_2H_5^+$ الناتجين كليهما هنا بقطع بسيط لرابطة. لكن حالات إعادة تنظيم الأيون الجزيئى تكون متكررة أيضا، وتتضمن كيمياء مختلفة تمامًا عن تلك الخاصة بأنواع متعادلة موجودة فى شروط عادية.

ومن السهل بشكل عام تحديد هوية الشظايا الخفيفة بفضل عدد كتلها. ومثال لذلك، فى جزئ عضوى، لا يمكن أن يكون أيون ذو ١٥ وحدة كتلة سوى CH_3 أو NH. لكن الشظايا الأكثر ثقلاً قد تناظر عددًا مرتفعًا لهويات مختلفة، وقد تكون الصيغة الخام لأيون جزيئى هى نفسها مجهولة. لذلك فإن عدد الكتلة ٨٨ قد يناظر ٢١ صيغة خام تتضمن العناصر C و H و O و N.

وهناك تقنيات متعددة فى SM للتخلص من هذا اللايقين. واحدة من بينها يتضمن قياس "الكتلة الجزيئية المضبوطة". وفى الواقع فإنه إذا كانت الكتلة الذرية للكربون هى ١٢,٠٠٠٠ اصطلاحيًا، فإن تلك الخاصة بالأكسجين ليست ١٦ بالضبط، لكنها ١٥,٩٩٤٩، والهيدروجين ١,٠٠٧٨... إلخ. فإذا أعددنا جهازًا لـ SM على "وضوح مرتفع haute resolution"، قادرًا على تحديد الكتل بتقريب أربعة كسور عشرية، سيكون من السهل تمييز $C_4H_8O_2$ من $C_3H_8N_2O$ (٨٨,٠٦٣٧)، وهوية ١٩ هوية أخرى لها نفس رقم الكتلة.

تحليل مزيج:

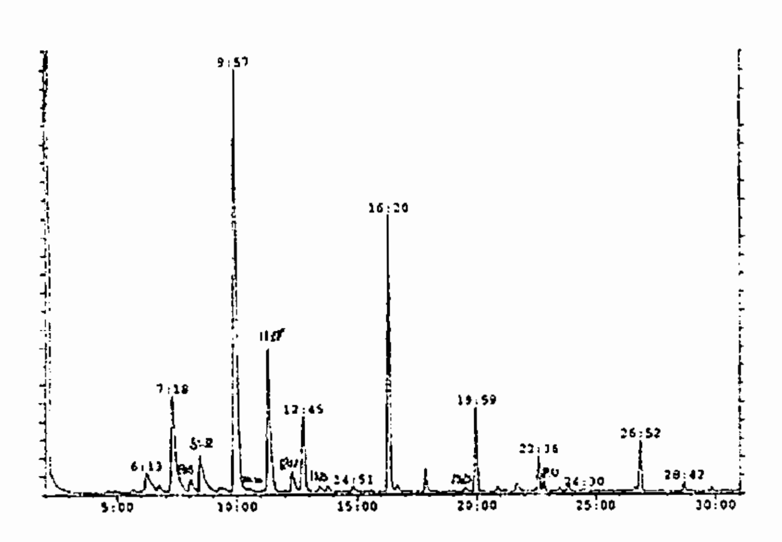
التزاوج الكروماتوجرافى الطيفى للكتلة

إذا كانت الطرق التى ذكرناها حتى الآن تتيح أحيانًا تحديد هوية مركبات مزيج خام، فإن هذا العمل سيكون دائمًا أكثر سهولة انطلاقًا من عينة خام. ومن ثم

فإن مشكلة فصل وتنقية مركبات مزيج ترتبط مباشرة بمشكلة تحديد هويتها. ومن بين الطرق المتعددة للفصل، نذكر "التحليل الكروماتوجرافى[٥٤] فى المرحلة الغازية". وفى هذه التقنية يتم تبخير المزيج وحقنه على طرف أنبوب زجاجى شعرى (قطره نحو ٠,١ مم)، وطوله بضع مترات، يعبره تيار من الغاز الخامل (الأزوت أو الهليوم). والجانب الداخلى للأنبوب مغطى بمادة يطلق عليها "طور ساكن phase stationaire". ومن جهة تميل جزيئات الخليط إلى أن تنجذب بالتيار الغازى، لكنها، من جانب آخر، معاقة بالتفاعلات بواسطة الطور الساكن. وحيث إن هذه التفاعلات تكون مختلفة عمومًا مع اختلاف الجزيئات، فإن المركبات المتنوعة للمزيج تتحرك بسرعات مختلفة فى الأنبوب وتنفصل بالتدريج كل منها عن الآخر. ويكشف جهاز، فى المخرج، وجود منتج أخذ فى وقت ما "زمنه لأن يُحتجز"، عبر طول الأنبوب. ويعتبر زمن الاحتجاز temps de retention هذا خاصية للجزئ ويمكن أن يكفى لتحديد هويته إذا تم العمل على مزيج مألوف كما هو الحال مثلاً مع الملوثات فى الجو أو الهيدروكربورات فى وقود. ويوضح الشكل ٩ المخطط الكروماتوجرافى chromatogramme لأحد مستخلصات خلاصة الخزامى اللافندر lavendre. وكل عمود يناظر مركب، مع زمن الاحتجاز الخاص به معبر عنه بالدقائق والثوانى.

---

(٥٤) التحليل الكروماتوجرافى chromatographie: طريقة خاصة فى فصل أجزاء مركب. (المترجم)



الشكل (٩)

للرسم الكروماتوجرافى لخلاصة اللافندر.

التزاوج مع مطيافية كتلة يتيح تحديد هوية كافور camphre، وأوكالبتوس،[٥٥] والبورنويل borneol، والزبدات،[٥٦] ولينااليل linalyle... إلخ.

(وثيقة تم الحصول عليها من س. لوتيلييه – بورى C. Loutelier - Bourhis)

ومن الممكن اقتران الكروماتوجرافى مع جهاز SM. وعندما يـأتى منـتج للكشف عنه، يُرسل إلى حجرة حقن المنظار الطيفي. وطيـف الكتلـة الـذى يـتم الحصول عليه يتضمن بصمة رقمية، ويمكن تحديد هوية الجزئ بالبحث الذى تـم تحويله إلى بحث رقمي فى مكتبة أطياف تحتوى علـى آلاف المراجـع. ومفتـاح تفسير الشكل ٩ يشير إلى بعض من مركبات مزيج.

(٥٥) أوكالبتوس eucalyptol: جنس من شجر للأحراج وللتزيين يـزرع عـادة فـى المنـاطق الحـارة. (المترجم)

(٥٦) الزبدات butyrate: ملح الحامض الزّبدى. (المترجم)

خلاصة

لقد أحدث مجيء المطيافية ثورة فى العمل فى مجال تحديد هوية الجزيئات، وهو ما يتمثل، على الأقل على مستوى البحث، فى التخلى عـن طـرق كيميائيـة لحساب طرق فيزيائية. وتعتبر الأخيرة فى أغلب الأحيان غير مدمرة ولا تحتاج إلا إلى كمية ضئيلة من المادة، فى حدود ملليجرام بشكل عام، وحتى نانو جـرام فـى مطيافية الكتلة. وإذا كانت مطيافية الأشـعة فـوق البنفـسجية وتحـت الحمـراء والموجات المجهرية محدودة فى مجال تحديد هوية الجزيئات الصغيرة، فـإن لهـا ميزة، على شكل مطيافية الانبعاث، هى الوصول إلى مناطق تقع بعيدًا عن جهـاز القياس، ومن هنا فائدتها للكيمياء الفلكية. وبـالعكس فـإن مجـال تطبيـق RMN ومطيافية الكتلة يمتد منذ الآن إلى جزيئات كبيرة فى الكيمياء البيولوجية. وتستخدم RMN أيضا فى الطب تحت اسم IRM (التصوير بالرنين المغناطيسى imagerie par resonance magnetique).

التحفيز[٥٧]

بقلم: كريستيان مينو

Christian MINOT

ترجمة: عزت عامر

التعريف

لماذا اخترت التحفيز من بين موضوعات محاضرات سنة ٢٠٠٠؟ ذلك لأن التفاعلات الحفزية تلعب دورًا مهمًا في حياتنا. وتدخل العمليات الحفزية في كل المستويات المألوفة في حياتنا، في جسمنا وفي المنتجات اليومية. وأغلب التفاعلات البيولوجية للجسم البشري هي تفاعلات حفزية: تلك التي تتيح لنا أن نتنفس، والتي تستجيب لنقل وتمثل الأطعمة، والتخليق الضوئي photosynthese للنباتات.. ويلعب التحفيز أيضا دورًا حاسمًا في العمليات الصناعية المهمة، لصناعة كل المنتجات الكيميائية لبيئتنا: فالأسمدة تُصنع انطلاقًا من النشادر ammoniac حيث التخليق عملية حفزية. والنفط المستخرج بشكله الخام غير قابل للاستخدام، ولا يمكن إنجاز تحويله إلى منتج قابل للاستخدام إلا بواسطة معاملة حفزية، وهي التكرير. وتنتج السيارات والمصانع منتجات ضارة (أول أكسيد الكربون أو أكسيدات الأزوت) ولا يمكن التخلص منها سوى بتحويلها إلى منتجات غير ضارة بمساعدة عملية حفزية. وبالنسبة للسيارات تكون الحفّازات من مادة غالية توجد على هيئة مبعثرة في أوعية حفزية.

وسوف أحاول توضيح ماهية التحفيز. يجب التأكيد أولاً على أن هناك مجازفة صناعية كبيرة محمية بالبراءات، وأن فهم الظاهرة، من وجهة نظر نفعية، ليس هو الهدف الأول، والأولوية هي لتحسين أداءات، وإذا كان لدينا حفّاز فعال،

---

(٥٧)نص المحاضرة رقم ٢٣٦ التي أُلقيت في إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٣ أغسطس ٢٠٠٠.

يمكن أن نحسن فعاليته بالتلمس. وهناك بحث حول الحفازات الجديدة بالكيمياء التوافقية combinatoire ينجز مجموعة كبيرة من عينات متفاعلة لاختيار المنظومات الواعدة.

وبشكل موازٍ يحاول القائمون على التجارب وعلماء النظريات تفسير العمليات الحفزية. وفهم عملية حفزية هو الذهاب "أبعد من النتيجة"، ويحتاج ذلك إلى وصف مسار المتفاعلات فى بيئاتها. وهذا هو المجال الذى يجب على التطورات أن تتحقق فيه خلال القرن القادم.

لنبدأ بقصة معروفة جيدًا حكاها لى جدى عندما كنت طفلاً. "كان لدى رجل ثلاثة أبناء و١٧ جملاً بسنامين، وعند وفاته، خصصت الوصية نصف الجمال لابنه البكر، والثلث للمولود عقبه والتسع للأصغر لكنه منع بالطبع أن يتم قطع جمل. عندئذ استشار الأخوة حكيمًا نصحهم بأن يستدينوا جملاً ويقومون بالقسمة على الكل، ١٨ جملاً: ٩ للبكر، ٦ للمولود عقبه، و٢ للأخ الأصغر. وفى نهاية القسمة كان هناك عندئذ جمل سليم للوفاء بالدين". ولم أفهم جيدًا الأجزاء فى تلك السن، لكن الجمل الذى تم استدانته وإعادته بدا لى مكتنفًا بالأسرار ويبدو أنه أعطانى صورة جيدة عن ماهية الحفّاز: مركب "يجعل تفاعلاً كيميائيًا ممكنًا لكنه هو نفسه لا يتغير" عند هذا التفاعل، مثل الجمل، الذى جعل من الممكن إجراء القسمة والبقاء سالمًا.

ولقد تم ابتكار كلمة تحفيز فى ١٨٣٦ بواسطة برزليوس Berzelius، بارون سويدى فى بداية علم الكيمياء الحديث، انطلاقًا من الكلمة اليونانية katalusis، فعل أذاب. وليس هذا مثلاً جيدًا لظاهرة حفزية يجب أن تتضمن تدخل مركب خارجى. وحاليًا، إلا فى حالة قيام المذيب بدور خاص تمامًا، لم نعد نعتبره جسمًا أجنبيًا لكن كبارامتر فيزيائى.

تصور مرتبط بالحركى

يرتبط تصور التحفيز بالحركى cinetique[٥٨] خلافًا للديناميكى الحرارى thermodynamique. وبطريقة مبسطة، إن الديناميكى الحرارى هو الذى يبين لنا إذا ما كان تفاعلاً يمكن أن يحدث أم لا. ويعرّفنا الديناميكى الحرارى بوجود خصائص محلية (أو خصائص حالة) تكون مصحوبة بكميات من المادة. وللتبسيط، سوف أستخدم بدون تدقيق مصطلح الطاقة. ينتهى التحول الكيميائى إلى كسب أو فقد طاقة، ولا تعتمد تلك التغيرات إلا على المتفاعلات والنواتج وهى مستقلة عن طريق انتقال الأولى إلى الأخيرة. وللذهاب من جرينوبل Grenoble إلى جنوه Genes سينتهى بك الأمر دائمًا إلى الهبوط ٢١٤ مترًا، وهو الفرق فى الارتفاع بين المدينتين. والارتفاع خاصية محلية والذى يتحدد بالمدينتين، مدينة المغادرة ومدينة الوصول: وتعرّفك الديناميكا الحرارية أنه لا بد أن يكون فى استطاعتك الذهاب من جرينوبل إلى جنوا بدون أن تجهد نفسك كثيرًا حيث ستصل إلى مكان أكثر انخفاضًا بمقدار ٢١٤ مترًا مقارنة بالارتفاع الذى انطلقت منه. والعكس سيكون أكثر إرهاقًا لأنك ستصعد. ومن الواضح أن هذه الإفادة غير كافية لوصف رحلتك. يمكنك المرور بالألب وتصعد من ثم قبل أن تهبط، ويمكنك استخدام الطائرة والصعود أيضا أعلى بكثير قبل الهبوط، ويمكنك الالتفاف حول الجبل والمرور على مارسيليا Marseille والبحر. وهناك طريق أكثر سهولة من طريق آخر. ويدرس الحركى سرعات التفاعلات. وفى التحفيز، لمتابعة تصورى، سيكون اهتمامنا بوسيلة انتقال وكما هو الأمر، فى الحياة، هناك عدة اختيارات: يمكن اختيار رحلة أسرع، أو أقل تكلفة أو تعطى متعة سياحية أفضل.

وتشير التجربة إلى أن العمليات المناقضة للديناميكا الحرارية لا مجال لها أبدًا. يمكنك الهبوط دون جهد، ولا يمكنك الصعود إلا ببذل جهد. وبالعكس فإن العمليات المسموح بها نظريًا قد لا يمكن رصدها أيضا. يجب أن يكون لديك ثمن

---

(٥٨) الحرائك cinctiques: جملة الآليات التى يتم بها إحداث تفاعل كيميائى. (المترجم)

التذكرة لتقوم بالرحلة لكن ذلك لا يضمن الوصول على الإطلاق. إذا كان هناك بئر لا يكون أحد مضطرًا لأن يسقط فى عمقه. كذلك فإن التفاعلات التى تكون مصحوبة بكسب فى الطاقة ليست طوعية:

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow H_2O \qquad - 56\ Kcal/\ mole$$

غاز متفجر

هذا التفاعل، الذى يصاحبه كسب فى الطاقة،[٥٩] يجب أن يتم بسهولة، ومع ذلك فإنه لا يحدث فى الشروط الطبيعية. إنه بإضافة البلاتين platine يصبح التفاعل فجائيا ومتفجرًا. وفى نحو ١٨١٧، دافى Davy، وفى ١٨٢٣، دوبيرينر Dobereiner، كانا قد سبق لهما ملاحظة أن هذا التفاعل يكون مصحوبًا عندئذ بلهب صغير، ذلك هو مبدأ علبة الصوفان[٦٠] المستخدم لإنتاج نار قبل وجود أعواد الثقاب. وبطريقة ما يمكن الاقتناع بأن التفاعلات التى يمكنها أن تحدث لا تحدث دائمًا بشكل تلقائى. ولو كان هذا التفاعل تلقائيًا، لكان أكسجين الجو قد استهلك سريعًا وما كانت الحياة لتصير ممكنة، ولأصبح الهواء غير صالح للتنفس.

ويتم تغيير سرعة أى تفاعل بطرق مختلفة بالتأثير على البيئة (بتغيير درجة الحرارة، والتعرض للضوء). ويتضمن التحفيز "إضافة منتج إلى البيئة لتغيير هذه السرعة".

يمكن أن يؤثر حفّاز على عمل أولى أو على توازن تفاعل مركب، ويمكنه فى النهاية التوجيه نحو تفاعل أكثر من تفاعل آخر.

(٥٩) تفسر الإشارة السالبة كسبًا فى الطاقة بالنسبة للوسط الخارجى: والنواتج (الماء) تكون أكثر استقرارًا من المتفاعلات التى بدأنا بها (H2 و O2). وتعود الطاقة الزائدة إلى الوسط الخارجى على هيئة حرارة.

(٦٠) الصُوفَان amadou: شىء يخرج من قلب الشجرة رخو يابس تُقدح فيه النار. (المترجم)

التأثير على فعل أولى

يتضمن أى تفاعل كيميائى بشكل عام تحطيم روابـط وتكوينهـا. وخـلال العملية، يتّجه الأمر غالبًا إلى التحطيم قبل إعادة البناء والمرور أولاً بوسطية تكون أقل استقرارًا فى الطاقة، وهذا ما يطلق عليه حالة انتقالية. والثمن الذى يُدفع هـو الصعود، أى الفرق فى الطاقة بين الحالة الانتقالية والمتفاعلات (طاقة حث التفاعل activation). وبمجرد عبور العنق، نعود إلى الهبوط نحو منتجات بدون جهد. وقد يغير شريك خارجى حالتى الاستقرار الانتقالى والمتفاعلات، وفى هذه الحالة يقـل الثمن المطلوب سداده فى البداية ويكون التفاعل سهلاً. حينئذ يكون لدينا ما نفعلـه بالحفّاز.

التأثير على موازنة تفاعل مركب

قد تكون الموازنة الكلية للتفاعل خادعة:

– قد لا يظهر الحفّاز فى الموازنة الشاملة، وهو أمر عادى: هو موجود فى البداية وفى النهاية ولا يتغير.

– لا تخبرنا الموازنة عن المسافة المقطوعة، لاسترجاع تصور المسافة بين جرينوبل وجنوا، والقارئ صاحب تذكرة القطار يعطينا إفادات أكثر فيمـا يتعلـق بالمواقف الوسطية.

رد فعل تخليق الأمونياك[٦١] على حفّازات ذات قاعدة حديدية

$$3\,H_2 + N_2 \rightleftharpoons 2NH_3$$

(٦١) أمونياك ammoniac: غاز ذو رائحة لاذعة مؤلف من الأزوت والهيدروجين. (المترجم)

يتضمن تقابل أربعة جزيئات وهو بعيد الاحتمال:

٣ مرات	$H_2 \rightleftharpoons 2H_{ads}$
١ مرة	$N_2 \rightleftharpoons N2_{ads}$
١ مرة	$N_{2ads} \rightleftharpoons 2\ N_{ads}$
٢ مرة	$N_{ads} + H_{ads} \rightleftharpoons NH_{ads}$
٢ مرة	$NH_{ads} + H_{ads} \rightleftharpoons Nh_{ads}$
٢ مرة	$NH_{2ads} + H_{ads} \rightleftharpoons NH_{3ads}$
١ مرة	$NH_{3ads} \rightleftharpoons NH_3$

الموازنة $3\ H_2 + N_2 \rightleftharpoons 2\ NH_3$

والتفاعل سلسلة متوالية من المراحل مع استجذاب[٦٢] مفكِّك للهيدروجين في حفّاز، استجذاب جزيئى للأزوت الذى يتفكك بعد ذلك على سطح الحفّاز. وهناك بعد ذلك هجرة أنواع مستجذبة وإعادة التنظيم حتى مجّ desorption[٦٣] الأمونياك المتكون.

والتفاعل الذى يتيح التخلص من أكسيدات الأزوت الضارة المنتَجة فى المصانع هو أيضا تفاعل مركب، ويُكتب:

$$4\ NO + 4NH_3 + O_2 \longrightarrow 4N2 + 6\ H_2O \qquad -334.0\ Kcal/mol$$

وهى معادلة تستدعى من جديد جزيئات لا يمكن أن تكون أولية: غير وارد توقع المقابلة المتزامنة لجزيئات جديدة، وتقطع عدد كبير من الروابط وتكوين أخرى. يجب أن تغير أربعة إلكترونات مكانها. وليس التفاعل الكلى سوى موازنة مراحل أولية متتالية يجب أن يشارك فيها الحفّاز. والحفّاز هو أكسيد فاناديوم vanadium، وكتابته لا تظهر فى الموازنة الشاملة لأنه لا يستهلك خلال التفاعل.

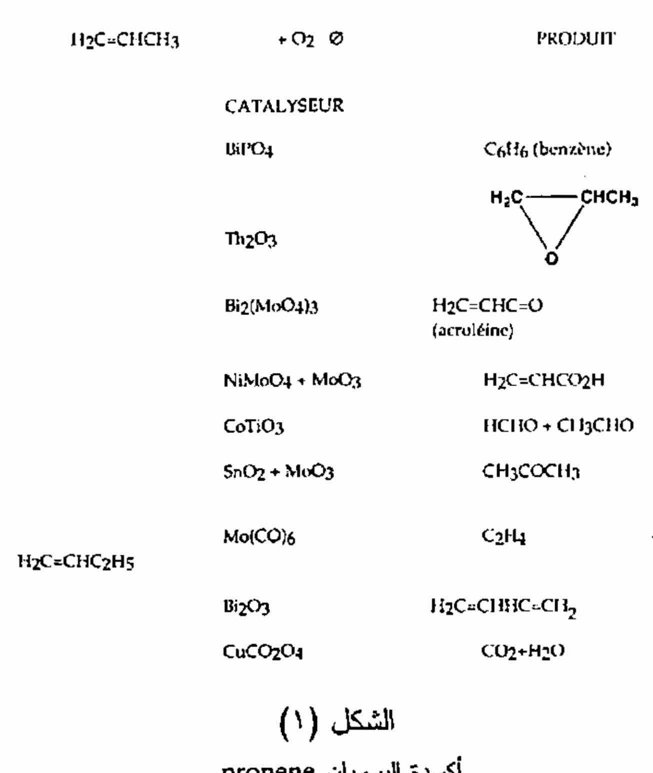
---

(٦٢) كلمة استجذاب adsorption للتمييز عن كلمة امتصاص absorption التى تختص بالإشعاعات، فيتم امتصاص الضوء بمركب بينما الجزيئى (المستجذب adsorbat) يرسب (ويستجذب) فى ركيزة.

(٦٣) مجُّ desorption: أو استِلفاظ، عكس مصّ. (المترجم)

التوجه أكثر نحو تفاعل أو آخر

إذا بدأت الرحيل من جرينوبل، لن يكون واضحًا أنك ترغب الذهاب في النهاية إلى جنوا، فقد يتغير مزاجك. الطرق تؤدى نحو الكثير من الوجهات الأكثر إغراء، وهو نفس الشيء فى الكيمياء، ويمكن لمتفاعلات أن تتحد بطرق متعددة لتصل إلى منتجات مختلفة بمرورها بتفاعلات متضاربة. ويغير الحفّاز معطيات المعركة ويوجه من ثم نحو نتيجة أكثر من غيرها.، حينئذ يكون الكلام حول "انتقائية selectivite". وفى تفاعل أكسدة البروبان propene، يمكن لكل حفّاز أن يوجه نحو منتج أكثر من منتج آخر (شكل ١).



الشكل (١)

أكسدة البروبان propene.

التحول

لاستكمال تعريف الحفّاز، يجب أيضا تقديم مفهوم التحول turnover. مـــن خواص الحفّاز ألا يُستهلك فى التفاعل، ويوصف بأنه متجدد. والنتيجـــة المباشـــرة لهذه الحقيقة أن الحفّاز يمكن المحافظة عليه بعد الاستخدام. وتتكرر التفاعلات مـــن حيث المبدأ بلا نهاية. وبالطبع، أنا أصف هنا موقفًا مثاليًا، ففى الواقع يشيخ الحفّاز. والحفازات المعدنية مغطاة بأنواع تغلق نشاطها: ويتعلق الأمـــر بـــشكل رئيـــسى برواسب كربون (رواسب الكـــوك cokage، رواســـب البلـــوميرات polymeres) ويتسمم الكبريت. وتعتمد فعالية الحفّاز على عدد التفاعلات المتتالية. ويترجم ذلـــك بالكلمة الإنجليزية turnover. إذا كانت الموازنة المالية مفضلة، فإن المحفزات يتم إحالتها للتقاعد. وتكلفة استرداد معدن نفيس فى الألومين alumine يكـــون حـــوالى ٢٠ فرنكًا لكل كجم. وفى حالة الأوعية الحفزية تكون كميات المعادن النفيسة بشكل عام ضئيلة جدا بحيث لا يحتاج الأمر إلى استردادها. وفى النهاية، كما هو الحـــال "فى كل الأشياء السيئة والحسنة"، يمكن الاستفادة من ظاهرة التسمم. يمكن استخدام كمية صغيرة من السم على هيئة معالجة مسبقًا لإيقاف التفاعلات الطفيلية وزيـــادة انتقائية الحفّاز.

المجالات الأربعة الرئيسية للتحفيز

الآن بعد أن عرّفنا ماهية الحفّاز، أود أن أقدم المجالات الأربعـــة الرئيـــسية للتحفيز والتى تهم فى الواقع كل الكيمياء تقريبًا: الكيمياء العضوية (هـــى التحفيـــز الحمضى القاعـــدى acido - basique)، الكيميـــاء الحيويـــة biochimie (وهـــى الإنزيمات)، الكيمياء العضوية المعدنية organometallique (وهـــى هنـــا تحفيـــز متجانس) وكيمياء الأسطح (التحفيز غير المتجانس).

التحفيز الحمضى القاعدى

لاحظ جولد Gould وهو عالم كيمياء عضوية أن نصف التفاعلات المكتوبة فى دائرة معارف (٧٦ بابًا فى ٨ مجلدات من "التفاعلات العضوية") يتم تحفيزها بالأحماض، أو بالقواعد أو بالاثنين. وكلما كان الحمض أو القاعدى شديدًا كلما كان الحفّاز قويًا. وسرعة اجتفاف(٦٤) ثنائيات الكحول(٦٥) diols، مركبات لها خاصيتا OH، تتلازم مع حمضية أحماض الكربوكسيليك التى تستخدم كحفّازات.

والتحفيز الحمضى القاعدى "يتجنب تحطيم أى رابطة بدون تكافؤ أولى".

لنأخذ مثالاً تحول إنول(٦٦) enol إلى خلون cetone، وهما مركبان لهما نفس الصيغة الإجمالية $H_2C=CH^{OH}$ ويتحول المنتج الأقل استقرارًا إلى خلون $H_3C—CH^{O}$، الأسيتالدهيد،(٦٧) وهو المنتج الأكثر استقرارًا، فى وسط قاعدى أو حامضى. ويتضمن تجزئ isomerisation الإنول إلى خلون انتقال هيدروجين من الأكسجين إلى الكربون. وبدون حفّاز يجب أن تنفصم رابطة OH، وهو ما يكلف طاقة، قبل أن يستطيع البروتون الانتقال والارتباط بكربون. ويسبق إنفاق طاقة الكسب الذى يطرح مشاكل الخزينة، وجوب الدفع مقدمًا ثم يتم استرداد المال فى النهاية. ومن المفضل بشكل عام أن تكون تحولات وانفصام الروابط متفقًا عليها.

وفى التحفيز القاعدى، يكون انفصام C-H مصحوبًا بتكوين رابطة B-H. حينئذ نحصل على إينوليت enolate يمكن وصفه بطريقتين وبالطريقة التالية، ألا وهى طريقة الخلون (الشكل ٢).

---

(٦٤) اجتفاف deshydratation: إزالة الماء من مركب كيميائى. (المترجم)

(٦٥) ثنائى الكحول diol: كلمة مركبة من di أى ثنائى و(alco)ol لتصبح فى الكيمياء dialcool. (المترجم)

(٦٦) إنول enol: مركب عضوى يحتوى على مجموعة هيدروكسيل مرتبطة بذرة كربون، التى بدورها ترتبط برباط مزدوج بذرة كربون أخرى. (المترجم)

(٦٧) أسيتالدهيد acetaldehyde: سائل عَطِر طيار لا لون له قابل للاشتعال. (المترجم)

énol~ cétone catalyse basique

$$H_2C{=}CH(OH) + B^- \rightarrow H_2C{=}CH(O^-) + BH \leftrightarrow H_2\bar{C}{-}CH{=}O + BH \downarrow H_3C{-}CH{=}O + B^-$$

énol *base* ... *cétone* *base*

الشكل (٢)

وفى التحفيز الحامــضى، يــسبق تكــوّن الرابطـــة C-H انفــصام O-H. والهيدروجين الموجود فى الرابطة C-H ليس هو الخاص بالرابطة O-H للإينــول (الشكل ٣).

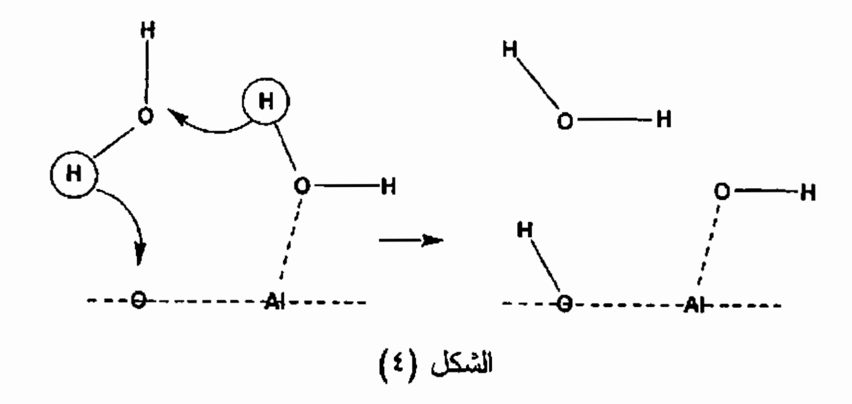
énol~ cétone catalyse acide

$$H_2C{=}CH(OH) + H^+ \rightarrow H_3C{-}C^+H(OH) \rightarrow H_3C{-}CH{=}O + H^+$$

énol *acide* ... *cétone* *acide*

الشكل (٣)

وتفكيك الماء أمر صعب لأن الروابط O-H قوية. لكنه يحدث بسهولة كافية على سطح أكسيد الألومنيوم alumine فى وجود جزئ آخر من الماء (الشكل ٤). ويتعلق الأمر بتحفيز حامضى وقاعدى فى نفس الوقت.



الشكل (٤)

الإنزيمات

الإنزيمات هى حفّازات انتقائية إلى حد كبير وذات مآثر وهى التى تحفز التفاعلات الكيميائية الحيوية. والبروتينات هى التى يمكنها أيضا أن تتضمن جزءًا غير بروتينى يطلق عليه تميم الإنزيم[٦٨] coenzyme الذى يحتوى غالبًا على أيون معدنى. وتتحول الفيتامينات باستقرارها فى الجسم إلى تميم الإنزيمات وتشارك فى ظاهرة حفزية ضرورية للحياة. والإنزيمات نوعية إلى حد كبير، لا تؤثر إلا على ركيزة واحدة أو عائلة مركبات ذات تجانسات بنيوية.

وتأتى النوعية من عاملين: "التزويج appariement" لكى يكون الحفّاز موجودًا و"الفعل الحفزى نفسه" الذى يتموضع فى موقع خاص، يكون متميزًا بوجه عام عن موقع التثبيت. ويجب أن يقترن الإنزيم بشكل تكميلى للركيزة حتى يتكيف. ويجب أن يتغير شكله ويتمكن من التكيف مع الشكل الصحيح (الهيئة conformation). ويتم التوصل إلى التزويج بواسطة روابط (جسور ثنائى الكبريتور disulfure، وروابط هيدروجين...). ويتيح هذا التقارب التماس فى موقع خاص مختلف عن مواقع التثبيت، "الموقع الفعال" حيث ينتج التفاعل المحفز.

---

(٦٨) تميم الإنزيم: مركب عضوى لا بروتينى إضافى ينبغى تواجده حتى يمكن للإنزيم حفز تفاعل معين. (المترجم)

والتكيف الهندسى سابق على الفعل الحفزى. وعملية الطى لا تحدث بسرعة كبيرة (١٠$^{-٢}$ ثانية). وهذه السرعة مدهشة (مفارقة ليفينتال Levinthal ١٩٦٨): إذا كان من الواجب أخذ عينات بكل الأشكال المحتملة من بروتين (٢^{١٠٠} هيئة بسرعة بمقدار سرعة ترددات اهتزاز ١٠^{١٣} هرتز)، ولا يكفى عمر الكون لذلك. وهذه أحد صعوبات المحاكاة. ويشبه الفعل الحفزى نفسه المجالات الأخرى للتحفيز التى يمكن أن تقدم نموذجًا للتحفيز الإنزيمى.

وتعوق الكوابح التحفيز. إما أن تكون مشابهة لركيزة وتخدع الإنزيم الذى يثبت عليها ولا يعود متاحًا (مزاحمة الكوابح التنافسية)، أو تغير الإنزيم بأن يثبت على موقع فعال دون أن تعوق تثبيت الركيزة.

التحفيز المتجانس

تناقض التسمية «متجانس» homogene التسمية «غير متجانس» heterogene. وفى التحفيز المتجانس يكون الحفّاز مركبًا عضويا معدنيا فى محلول يحتوى على وسط متجانس. وهذا مركب معروف جيدًا سواء من وجهة نظر هندسية أو إلكترونية. وفى التحفيز غير المتجانس ينتج التحفيز يتدخل مادة صلبة ومرحلة سائلة أو غازية. والحفّاز موقع من سطح مادة صلبة يتغير تبعًا للموضع. وفائدة التحفيز المتجانس أنه يمكن أكثر من ذلك التحكم فيه، فهو يتعلق بموقع وحيد حيث البيئة محددة جيدًا.

وينتج التفاعل خلال "دورة حفزية" ينتقل خلالها مركب معدن تحويل من شكل أقل استقرارًا إلى شكل أكثر استقرارًا ثم يتم تجديده. ويتم الربط بين استقرار المركبات المعدنية واقتطاع إلكترونات التكافؤ: ١٦ أو ١٨، ١٨ بالنسبة للمركبات الأكثر استقرارًا، و١٦ فى حالة الحفّازات التى يتم استخدامها.

والحفّاز الذى سأتكلم عنه $[Rh(CO)_2I_2]^-$ له أربع روابط غير تساهمية للتكافؤ ligands (أربع مجموعات من الذرات مرتبطة فى المعدن) و١٦ إلكترون:

لـــ Rh^{+} عدد ٨ إلكترون تكافؤ. وتحمل الروابط التساهمية للتكافؤ الأربـــع I وCO إلكترونين أى بإجمالى ١٦ لـــ

$$\left[I_2Rh(CO)_2 \right]^{-}$$

والشكل الوسطى الذى سنجده هو $[Rh(CO)_2I_3Me]$ له ٦روابط تـــساهمية للتكافؤ، الثلاثة I، واثنان CO وMe تحمل ١٢ إلكترونًا لـــ

$$\left[Rh(Me)(CO)_2I_3 \right]^{-}$$

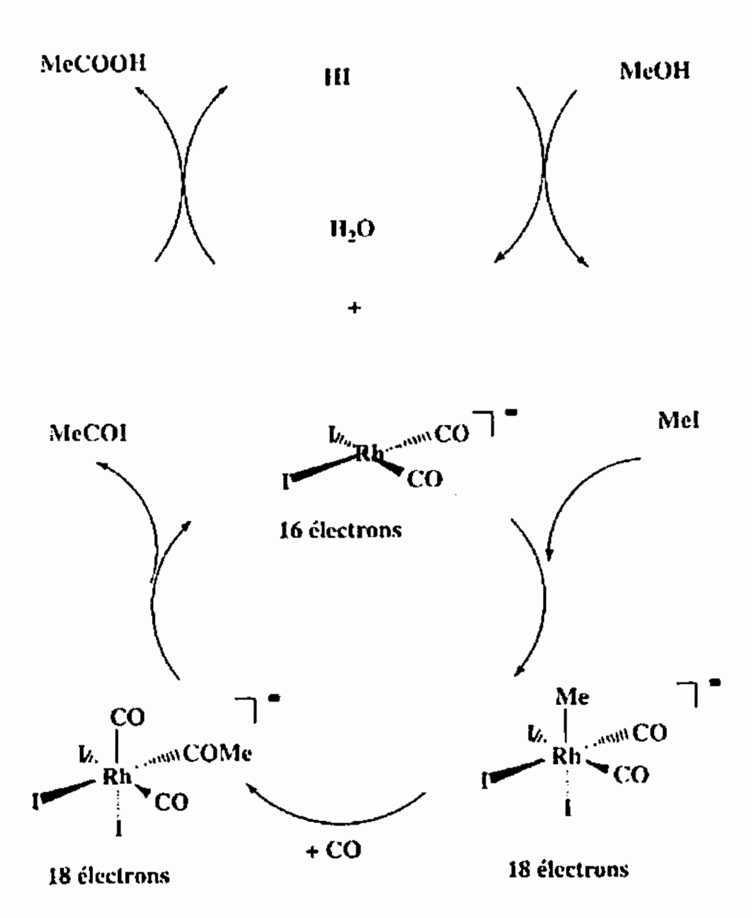
والروديوم rhodium يكون على هيئة Rh^{3+} مع ٦ إلكترونات تكافؤ. وينتج عن ذلك إجمالى ١٨ إلكترونًا.

وهذه المركبات سنجدها فى طريقة مونسانتو Monsanto لتكوين حـــامض الخليك acitique. ويتم بهذه الطريقة إنتاج حامض الخليك ٤ ميجا طن سنويًّا فـــى المتوسط، وهى طريقة فعالة للغاية. والتحول turnover يكون من ١٠ إلـــى ١٠٠ تفاعل فى الثانية وعمر الحفّاز يناظر تقريبًا عشرة ملايين من التفاعلات المتتابعـــة (بضع ساعات يوميًا).

ويتضمن التفاعل إدخال CO واحد بـــين كربـــون وهيـــدروجين الميثـــانول methanol فى وجود مركب معدنى سأصفه على الفور.

$$MeOH + C0 \xrightarrow{[Rh(CO)_2I_2]^-} MeCOOH$$

ويتكون الميثانول بمزيج CO/H_2 والحفّاز $[Rh(CO)_2I_2]^-$ ويتكون انطلاقًـــا من أى مصدر روديوم ويودور iodure (الشكل ٥).



الشكل (٥)

والدورة السفلية هي الدورة الحفزية، وتؤثر على التحول

$$MeI + CO \longrightarrow MeCOI$$

وتتضمن مركب بـــ ١٦ إلكترونًا يتيح إضافة مجموعة ميثيل لتكوين مركب له ١٨ إلكترونًا، الذى ينتظم مرة أخرى لإدخال CO ثم تحرير MeCOI لتكـــوين

مركب له ١٦ إلكترونًا. والدورة العليا تناظر بالضبط تبادلاً بين المجمـــوعتين OH وI، المحفز بواسطة الماء وHI.

$$MeCOI + MeOH \longrightarrow MeCOOH + MeI$$

والعقبة الرئيسية للعملية هى ثمن الحفّاز. ومركب الروديوم باهظ التكلفة: ١ وزن جزيئى جرامى mole من مركب الروديوم يتكلف ٢١٠٠٠٠ فرانك تقريبًـــا. وبالمقابل فإن الإيودورات iodures رخيصة الثمن، ومشكلتها أنها تتآكل.

وتعتبر العمليات المتجانسة فى التحـــول الكبيـــر turnover grand نـــادرة للأسف.

التحفيز غير المتجانس

تأتى أفضلية التحفيز غير المتجانس على التحفيز المتجانس على وجه الدقـــة من التحول turnover. فالتفاعلات تنتج بسرعة أكبر بكثير فى نفس الموقع الفعال، وهذه المواقع الفعالة أكثر عددا بكثير.

والحفازات الرئيسية هـــى المعـــادن، وأكاســـيد المعـــادن والزيوليتـــات[٦٩] zeolithes. والمعادن المستخدمة فى التحفيز هى تلك الموجود على يمين الجـــدول الدورى، وتتضمن المعدنين النفيـــسين، الروديـــوم والبلاتـــين platine. وتـــستخدم المعادن بشكل أساسى فى الأوعية الحفزية (بنسبة تجعلنا نتصورها إســـرافًا)، فـــى التكرير النفطى (يتعلق الأمر بتحول هيدروكربور ذى نسبة ضئيلة مـــن الأوكتـــان octane إلى آخر بنسبة أوكتان أعلى بكثير)، وفى إنتاج منتجات ذات قيمة مضافة، مثلاً تركيب مواد عطرية يتم استخدامها بعـــد ذلـــك لتـــصنيع النيلـــون nylon أو متعددات الإستر polyesters، وبشكل أكثر عمومية للمنتجات القاعدية حيث تتدخل

---

(٦٩) الزيوليتات: مجموعة من معادن سليكات الألومنيوم المائية التـــى تحـــوى الـــصوديوم والبوتاســـيوم والكالسيوم والباريوم، توجد فى الصخور البركانية. (المترجم)

الكيمياء (العطور، الأصباغ، والملابس، والمواد الجديدة والأدوية، هذه هي بيئتنا اليومية ومن الأفضل استخدام النفط في زيادة قيمته وليس حرقه). والمعادن هي أيضا سلعة نفيسة ومحدودة. وتصل تكلفة البلاتين إلى ١٦٠٠٠٠ فرانك للكيلو. وفي ١٩٩٩ ظلت صناعة الصاغة هي المستخدم الرئيسي للبلاتين (٤٨ في المائة)، لكن الأواني الحفزية استهلكت منه ٢٧ في المائة. ومثلت الصناعة وحدها (إجماليًا الاستخدامات في مجال الكيمياء، والكهرباء، والنفط، والزجاج) ١٧ في المائة. وعقبة التحفيز غير المتجانس أن الحفّاز يصعب تمييزه إلى حد كبير. ويتضمن مواقع كثيرة لا تتشابه جميعًا وقد يكون لها فعاليات مختلفة.

الركائز المعدنية المختلفة

توجد المعادن على هيئة ركام (خلائط معدنية agregats)، أو أحادية البلورات monocristaux أو معادن قائمة على ركيزة، من السيليس (رمل الصوان) silice أو من أكسيد معدني.

والخلائط المعدنية قد تكون الأكثر أهمية من وجهة نظر صناعية: ينتج التفاعل على السطح، وهناك نسبة كبيرة من الذرات على السطح بالنسبة للذرات المتوارية في الداخل. ولهذه الذرات القليل من الجيران لذلك ترتبط بسهولة أكثر. وعيبها بالنسبة للتحليل أن يكون تحديدها سيئًا إلى حد ما. وهناك الكثير من البنى القريبة ومن الصعب تمييز موقع فعال. وبشكل مواز من الصعب نمذجتها بنهج نظري. وهذا هو سبب فائدة فهم التحفيز انطلاقًا من أحاديات التبلر الأقل نتائج ولكن الأفضل من ناحية تمييزها. ومن المهم التمييز الجيد للمنظومة تحت الدارسة في الأحوال القابلة للإنتاج، وأن تكون طبيعة الموقع الفعال محددة جيدًا. ويمكن قطع البللورات أو جعلها تكبر بطريقة تجعل وجهًا منها محددًا تمامًا حيث تكون كل المواقع متشابهة. وتُستخدم للدورية periodicite للقياسات الطيفية. وتكون نافعة أيضا لعلماء النظريات لعمل النماذج. ومع ذلك فإن الدراسة على أسطح خاصة جدا كشفت مفاجآت.

وفى بداية التحفيز بواسطة المعادن، كان ساباتييه Sabatier (عالم الكيميـــاء الفرنسى فى بداية القرن الماضى، الحاصل على جائزة نوبل فى ١٩١٢) قد درس تفاعلات الهدرجة hydrogenation واستعان بحقيقة أن الهيدروجين يتفكك بسهولة كبيرة فى وجود البلاتين.

$$2Pt + H_2 \longrightarrow 2\,Pt - H$$

وحديثًا أوضح سامورجاى Samorjai، بروفيسور فى بيركلـــى Berkeley، أن احتمال كسر رابطة H–H على السطح الأكثر استقرارًا للبلاتين كان تحت حد الكشف، ١٠ ^-٣^. ويزداد هذا الاحتمال على أسطح أقــل كثافــة ومـــن ثــم أكثــر متفاعلات، وهو قريب من الوحدة على الأسطح ذات الدرجات وقريب من العيوب.

والأغلب أن سطح الحفاز لا يكون سطحًا متكونًا خاليًا من العيوب بواســطة قطع سليم لبلورة، فهناك عيوب، تــدرجات، ومـــصاطب. وتكـــون الاســتجذابات adsorptions موجودة بطريقة مختلفة على هذه التفاوتات للسطح. ويمكن أن تكون الاستجذابات أكثر شدة على قمة التدرج لأن الذرات أقل ترابطًا أو بــالقرب مـــن التدرجات لأنه من الأكثر سهوله عندها تكوين عدة روابــط فـــى نفــس الوقـــت. والأنواع المستجذبة التى يكون عليها أن تتدخل فى التحفيز يمكـــن أن توجـــد فـــى أغلب الأحيان بالقرب من العيوب.

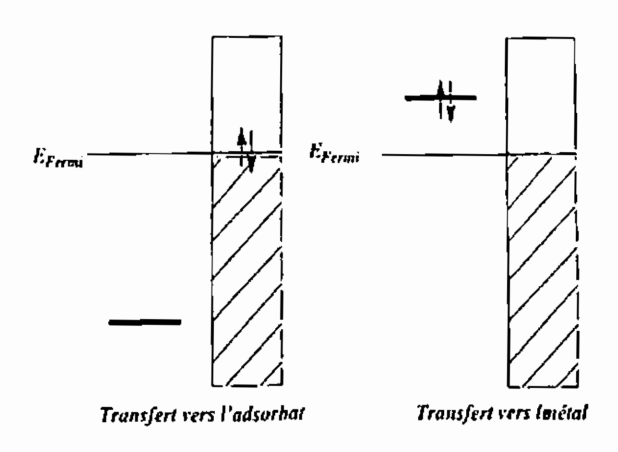
وفى النهاية، فإن وجود ركيزة يمكـــن أن يغيـــر الامتـــصاص الكيميـــائى chimisorption للمتفاعلات والمنتجات. والتأثير كبير جدا مثلاً على هدرجة CO. وهذا التفاعل حدث بشكل أكثر سهولة عندما كان النيكل nickel موضوع فى أكسيد تيتان titane أكثر مما لو كان النيكل مصمتًا.

عوامل ضبط الاستجذاب

الضبط الإلكترونى

فى البللورات، يكون للروديوم، والبلاتين والنحــاس نفــس الطوبوجرافيــا (مكعب بأوجه متمركزة)، ونوع الاستجذاب وقوة الاســتجذاب وارتفــاع حــاجز الاستجذاب تتغير مع طبيعة المعدن. وتعكس هذه التغيرات جيدًا أهميــة التخفــيض الإلكترونى (ليس لهذه المعادن نفس عدد إلكترونات التكــافؤ، ٩، أو ١٠، أو ١١). ويجب أن نلاحظ أنه مع اختلاف المركبات المعدنية للانتقال، لا يمكن بعــد ذلــك تخصيص ٢ إلكترون للروابط. ويتغير عدد الإلكترونات لكل رابطة ويظل أقل من ٢. ويتعلق الأمر هنا باختلاف جوهرى مع المنظومات الجزيئية الــصغيرة حيــث تؤثر الإلكترونات بالزوج على الروابط. وبعكس المركب المعدنى للتحول، لا يمكن لأى تخفيض للإلكترونات أن يخضع لقواعد بسيطة (كما هو تخفــيض ١٦ أو ١٨ إلكترونًا).

وفى المقابل، حيث إن هناك عددًا كبيرًا من ذرات المعدن، هناك أيضا عدد أكبر من إلكترونات ذات طاقات قريبة جدا. ويمكن بسهولة إضافة أو فقد إلكتــرون فى هذه المجموعة. ويكون على مستوى الطاقة الأكثر ارتفاعًا لإلكترونات المعــدن مستوى فيرمى Fermi، أن يلعب دورًا حاسمًا. ويكون على المــستجذب adsorbat أن يأخذ أو يعطى إلكترونات تبعًا لما إذا كان لديه إمكانية لتسكين هذه الإلكترونات أفضل أو أقل جودة من ناحية الطاقة. ويقــال إن "المعــدن يقــوم بــدور خــزان إلكترونات" (الشكل ٦)



الشكل (٦)

وتغير الإلكترونات المنقولة بنية المستجذب وتضطر المعدن أيضا إلى تغيير شكله. ويقال إن هناك إعادة بناء للسطح بواسطة حث الاستجذاب. ونـــرى الآن أن إعادة بناء ذرات السطح هذه قد يكون لها تأثير مهم على التحفيز.

الضبط الهندسى. تماثلات الموقع الفعال.
التشابه مع البنى المألوفة

من الصعب فصل ما هو هندسى عن ما هو تفاعل إلكتـــرون. والتفـــاعلات متعلقة بالإلكترونات ولكن لكى يتم تفاعل ما، يجب أن تكون هناك قرابة هندســـية (تماثل شائع). وبحثت النماذج الأولى للاستجذاب عن تشابه بين بنى المواقع الفعالة والمستجذبات: البنزول benzene سداسى الشكل وسوف يُستجذب جيدًا على السطح "السداسى" للمعادن. وإذا كانت هناك حقيقة فى هذه الفكرة تقود دائمًا عنـــد البحـــث عن نموذج مقبول، فإن تطبيقها بعيد عن أن يكون تلقائيًا. يحدث الاستجذاب أيـــضا على السطح "المربع". وهذا السطح فعال هو نفسه بما فيه الكفاية لأنه أقـــل كثافـــة ولأن الذرات الأقل اتصالاً بالروابط تكون أكثر فعالية. وإذا عدنا للسطح الـــسداسى

نجد أن له ثلاثة مواقع رئيسية: فوق ذرة، وفى جسر بين ذرتين، وفى وسط ثـلاث ذرات. وأفضل طريقة لموضعة البنزول للمحافظة على التماثل الـسداسى سـتكون بمركزة البنزول على الاتجاه الرأسى لذرة. ويؤدى الموقعان الآخـران إلـى فقـد التماثل. ومع ذلك فهما اللذان يكونان مشغولين: فى الروديـوم، يكـون البنـزول متمركزًا فوق موقع ثلاثى وفى البلاتين فوق موقع جسر.

ويوحى لنا التشابه مع البنى المألوفة بنماذج استجذاب تبدو لنا منطقية. فـإذا أخذنا كنموذج بنية الميثان methane (الشكل ٧)، يكون لدينا انطباع بوجـود هـذه البنية عندما تكون كِسر الهيدروكربورات مُستجذبة بطريقة تجعل للكربـون دائمًـا أربعة جيران. نتوقع إذن نماذج استجذاب مختلفة بالنسبة لـــ CH وCH2 وCH3 على الوجه السداسى للمعادن (الشكل ٨).

وموقع الاستجذاب يكون بشكل عام المذكور هنا، ولكن ليس دائمًـا، وفـى حالة النيكل فإن الموقع الثلاثى يكون دائمًا مفضلاً أكثر من المواقع الأخرى.

الشكل (٧)

ثلاثة اتجاهات للميثان

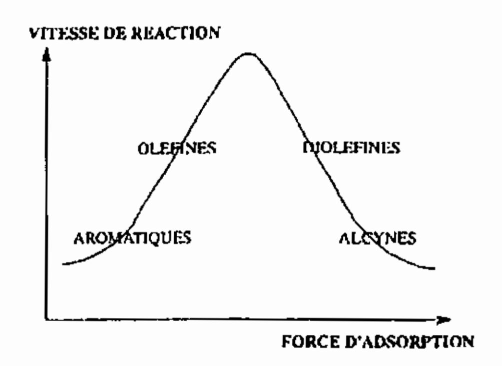
CH_3 au-dessus d'un atome CH_2 en pont CH en site ternaire

الشكل (٨)

استجذاب كِسر الهيدروكربور المناظر.

الاستجذاب والتحفيز

الاستجذاب ضرورى للتحفيز لكن التحفيز لا يُختصر فى الاستجذاب. وبدون الاستجذاب لا يكون التحفيز ممكنًا، لكن ليس بالضرورة أن يكون الاستجذاب بالغ الشدة (الشكل ٩). وكان ساباتييه قد أشار سابقًا إلى أن الاستقرار فى الوسط الشائع مع الحفّاز يجب أن يكون "مستقرًّا بما فيه الكفاية ولكن دون زيادة". ويجب على الحفاز الجيد أن يكوّن "روابط بقوة متوسطة". وإذا كوّن روابط ضعيفة جدا يكون غير فعال وإذا كوّن روابط قوية جدا تكون الأنواع المُستجذَبة متجمدة على السطح ولا تصبح قادرة على الاتحاد من جديد. هناك إذن موقف أمثل ويكون لفعالية المعادن الممثلة فى وظيفة قوة الاستجذاب هيئة بركان. وبمصطلح الفعالية يجب "صعود المنحدر". وهذا يعنى استجذاب أكثر قوة بالنسبة للعطور وأقل قوة بالنسبة للألكينات[٧٠] alcynes. وهذه صعوبة بالنسبة لفهم التحفيز، لأنه لا يجب أن نمد بالضرورة أنماط استجذاب النتائج المباشرة إلى التفاعلية reactivite.



الشكل (٩)

---

(٧٠) ألكين alcyn: من الكحول alc(ool)، نوع من الهيدروكربور دهنى بشكل عام على صيغة CnH2n-1 وله رابطة ثلاثية. (المترجم)

وهناك مثال آخر يميز علم الأسطح، الذى يدرس الاستجذاب، عن التحفيـز، يتعلق بوفرة المنتجات المُستجذَبة. ينكب الأول على ملاحظة الأنـواع المُـستجذَبة الأكثر تعددًا. وهذه الإفادة هنا ليست بالضرورة جيدة بالنسبة للتحفيز. واسـتجذاب الأثيلين ethylene على الروديوم rhodium يؤدى إلى عدة أنواع مـن مركبـات الاستجذاب: وعلى الأغلب نحـصل علـى كِسرة مـستجذبة بقـوة، الأثيليـدين ethylidyne، CCH_3. وهو الذى نراه والذى نحسبه بكونه الأكثر استقرارًا. ومـع ذلك فإن هدرجة الأثيلين تتعلق بنوع جزيئى يرتبط بشكل ضـعيف (المركـب π) والذى يكون بالغ الندرة على السطح. والتفاعل الذى يتضمن هذا النوع القليل يكون أسرع بمليون مرة من ذلك الذى يتضمن منتجًا من الأغلبية!

آليات التفاعل

تكلمت بشكل خاص حتى الآن عن الاستجذاب بالنسبة للمعـادن، وأريـد أن أقول الآن بعض الكلمات حول آليات التفاعل (آليات من نوع إيلى – ريديل Ealey - Rideal). ولمدة طويلة كان يتم تمثيل الهدرجة hydrogenation الحفزية بـزوج من الروابط بافتراض أن واحدًا فقط من المتفاعلات هو الذى تم استجذابه. وتحدث الهدرجة على نفس جانب الرابطة المزدوجة بعكس التفاعلات بالجمع فى المرحلـة الغازية. وفى النموذج لا يتعلق الاستجذاب إلا بواحد من المتفاعلين، ويتفاعل الآخر على هيئة غاز (يلتقط الجزئ الغازى وهو منطلق شريكه المستجذب على السطح). ويفكك النيكل الهيدروجين الذى يكون مستجذبًا وقد يتفاعل على السطح مع الأثيلين الذى يكون متموضعًا فوقه. والعكس قـد يـؤدى إلـى نفـس التوجـه بالنـسبة للهيدروجينات. وهذا النوع من التفاعل الذى يتضمن آليات أقل حساسية عند السطح حيث أحد المتفاعلات يفصل الآخر بدون تفاعل حقيقى مع السطح، يعتبر نادرًا فى الواقع. والآلية الأكثر شيوعًا ليست هذه. ويتم استجذاب التفاعلين كليهما، وهذه هى آلية لانجموير – هينشلوود Langmuir - Hinshelwood. وتحدث الهدرجة بمثـل هذه الآلية. ويجب أن تنتقل حينئذ الجزيئات المستجذبة (أو الكِـسر المـستجذبة إذا

كان الاستجذاب تفككيًا) على السطح لتتقابل من جديد. وتكون الأنـــواع المـــستجذبة فى الواقع غالبًا متحركة على السطح. والصور المقاتلة إلى حد ما التى تستحضرها هاتان الآليتان هى، بالنسبة للأولى، تلك الخاصة بأحـــد الجـــوارح الـــذى يمـــسك بضحيته ابتداءً من السماء وبالنسبة للثانية هى صورة معركة مشاة.

الركائز الأخرى

تتيح أكاسيد المعادن (وأيضا الكلوريـــدات chlorures) زيـــادة عـــن ذلـــك إمكانيات أكثر من المعادن. وتقدم نوعين من الذرات على السطح: أيـــون موجـــب الشحنة معدنى وأيون $O^=$، والموقع المعدنى حامضى والموقع $O^=$ قاعدى. وعلـــى الأسطح اللامائية، ترتبط كل المركبات العضوية، عندما لا تتفكك، بأيونات موجبة الشحنة معدنية التى تكون مواقعًا حمضية. وعندما يكون التفاعل قويًا، فإنها تتفكـــك إلى زوج أيونات يقترن بمواقع السطح ذات الشحنة المعاكسة.

الزيوليتات zeolthes. والمواد الصلبة المسامية المجهريـــة microporeux هى بنى يمكن داخلها مزج مركبات إضافة يمكن أن تكـــون متاخمـــة وتتفاعـــل. وتتكون من وريقات. وتتكون سيليكات الألومنيوم (زيوليتات أو منخل جزيئى) من شباك أقفاص مع مواقع حمضية أو قاعدية. وتلك حفازات رائعة بالنسبة للتكـــسير الحرارى craquage الحفزى للنفط. ومرة أخرى فإن البنية المسامية تقلد الطبيعـــة. والعظام مصنوعة من الأباتيت apatite حيث البنية تكون متقاربة جدا.

آفاق

ألح على حقيقة أن التحفيز يتعلق تقريبًا بكل الكيمياء، وتعتبـــر التفـــاعلات الأساسية التى تنشأ عن تقابل متفاعلين نادرة. ويبدو لى أن تطور التحفيز مـــرتبط بتطور الكيمياء ويناظر أن نأخذ فى اعتبارنا بشكل أكثر اكتمالاً ماهيـــة التفاعـــل، وألح على حقيقة أنه يجب الوصول إلى ما وراء الموازنة البسيطة. ربما يكون من

المخيب للأمل عدم الإعلان عن ثورة فى القرن المقبل لكن العلم قائم أيضا على ثورات وتعمقات. ولدينا المفاهيم لنفهم المادة، لكن يظل هناك عمل هائل للمعرفة وهو يتعلق بالسيطرة على تحولات المادة لقبول بعضها واستبعاد أخرى.

ويتضمن العلم المعاصر فى الوقت الراهن استكشاف تأثير الحفّازات على المستوى الجزيئى. ويتيح علم الأسطح طرقًا للمعرفة المنطقية لتغير النشاط الحفزى والانتقائية. والهدف هو الوصول إلى نحو ١٠٠ فى المائة انتقائية. ولأجل ذلك يجب استخدام مقومات مختلفة تتطلب فهمًا جيدًا لما يحدث:

- إغلاق مواقع الكثير من المتفاعلات بطريقة تهدف إلى اختيار الموقع الفعال.
- استخدام حفازات ثنائية الوظيفة: خلائط. وقد تم استكشاف ذلك سابقًا بالنسبة للأوعية الحفزية.
- تغيير الخصائص بتفاعلات ركيزة معدنية.

والتحفيز بالذات يعتبر مجالاً جبهويًا. وهذا حقيقى بالنسبة للتحفيز الإنزيمى، وهذا صحيح بالدرجة الأولى بالنسبة للتحفيز غير المتجانس الذى ينتج من تداخل صلب - سائل، وصلب - غاز، وصلب - سائل أو صلب - صلب. وهذا هو التداخل بين الهواء، والبحر والأرض، ذلك المتعلق بجوانب كانت ذات أهمية بالنسبة لأصل الحياة وتطور الأنواع.

وتتم إدانة التحفيز، وكذلك الكيمياء، بطريقة سيئة عند ربطه بتطور صناعى مفرط بسبب التلوث. ذلك نوع من الظلم أن نحمّل هذه الأداة خوفنا من استخدامها بناء على ما يصنعه البشر بها. التحفيز ضرورى للحياة، وبالاستخدام الذى قمنا به، تعتبر هموم منع التلوث مهمة جدا فى الوقت الراهن.

وفى بداية القرن العشرين (١٩٠٢)، كان أوستفالد Ostwald قد طور عملية أكسدة الأمونياك ammoniac فى ثانى أكسيد الأزوت كسابقة لصناعة حامض النتريك. ويهمنا حاليًا التفاعل العكسى، ذلك المتعلق بالتقليل من ثانى أكسيد الأزوت لحماية بيئتنا. وفهمنا للكيمياء يعنى التحكم فى التحويلات. ومثلها مثل الأدوات

الأخرى، وبطريقة أكثر عمومية كما هو الأمر بالنسبة للمعرفة، يمكن للكيمياء أن تؤدى إلى استخدام جيد أو سيئ وتتبع التطورات الخيارات السياسية والمالية التى تنجم عنها.

هل يمكن التقدم فى عالم تحويلات المادة فى اتجاه يكون ملائمًا دائمًا، مع تجنب النقائض السلبية؟ يساعدنا التحفيز فى إنجاز الاختيارات الأفضل. ولست متأكدًا من أن وجود التناقضات أمر سيئ كليًا. وعندما تحدثت عن التسمم، قلت إنه يمكن تحويل هذه الظاهرة لصالحنا. ولدينا فى الوقت الراهن ميل إلى إعطاء التقدم قيمة سالبة، وإنه لحقيقى أن كل تقدم يصاحبه ضرر. وقد يحدث بشكل آخر، ويكون عامل عدم توازن بالنسبة للعالم، إذا لم يظل هناك ضبط للتقدم. وما نصفه بالضرر يلعب أيضا من وجهة نظرى دورًا معدلاً بإعاقة التطور وبأن يتيح للعالم المحافظة على توازنه. والمعرفة الأفضل بالتطورات الممكنة قد تساعدنا على التوصل إلى الخيارات الأفضل للإقلال من الأضرار.

ويبدو لى من المتناقض أن نعارض الكيمياء والطبيعة. ويوضح المبدأ الأساسى للافوازيه Lavoisier "لا شيء يخلق من العدم، ولا شيء يُفقد إلى العدم، والكل يتحول" بشكل جيد أن الكيمياء ليست سوى إعادة تنظيم للأمور الموجودة فى الطبيعة. وأود أن أوضح أن التحفيز قد يساعد على ضبط عمليات إعادة التنظيم هذه. وأهمية التحفيز أساسية فى الجسم الإنسانى. والإنجازات التى نحققها فى العالم التكنولوجى والصناعى ليست أيضا سوى محاكاة للعمليات الطبيعية، وغالبًا أيضا ما تكون محاكاة غير متقنة، لكن التحفيز يجب أن يتيح الاقتراب من تحويلات دقيقة وماهرة تعرف الطبيعة صنعها.

التشكل الكيميائى للكائن الحى:
التفاعلات التخليقية للتواترات والأشكال[71]

بقلم: باتريك دو كيبيه

Patrick De KEPPER

ترجمة: عزت عامر

الكيمياء هى علم التحويلات الجزيئية للمادة. وتبين التفاعلات الكيميائية على المستوى العيانى موازنات هذه التحويلات، وبقول آخر تحدد بشكل كمى كيف تتحول المركبات الأولية (أى المتفاعلات) إلى مركبات أخرى أكثر استقرارًا (أى المنتجات). وفى أكثر الأحيان تتم هذه العمليات عبر تسلسلات من المركبات الوسطية. وعلى المستوى المجهرى ينتج عن هذه التحويلات عمليات إعادة اتحاد وتبادلات للعناصر المكونة (إلكترونات، أو ذرات أو مجموعات ذرات) خلال التصادمات الصدفوية بين هذه المركبات. وتكون التصادمات ممكنة بفضل الحركات الصدفوية للجزيئات تحت تأثير الحث الحرارى (الحركة البراونية brownien). ومن حيث المبدأ يمكن للتصادمات اللاحقة بين المنتجات أن تعطى انطلاقًا من جديد لتكوين متفاعلات لكن فعالية التحولات لا تكون بوجه عام متماثلة فى الحالتين. وبالنسبة للحالات المعطاة، يكون اتجاه التحويل مفضلاً. وفى منظومة مغلقة، مثلاً فى قارورة بسيطة، يتم التوصل إلى تثبيت تركيز لكل الجزيئات فى بداية زمن محدد، عندما تكون سرعات التحويل على الجانبين متساوية. وتناظر حالة الثبات هذه، حيث لا يحدث أى تغيير شامل، حالة التوازن الديناميكى الحرارى. وفى المائع (سائل أو غاز) تنشر الحركات الصدفوية الجزيئيات المختلفة فى كل الوسط. وعلى المستوى العيانى تكون ظاهرة انتشار الجزيئات هذه هى محرك ما يُطلق عليه الانتشار diffusion.

---

(٧١)نص المحاضرة رقم ٢٣٧ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٤ أغسطس ٢٠٠٠.

ويعتبر الانتشار عملية مجانسَة homogeneisant، وهذا ما يحـــدث لنقطـــة حبر توضع فى كوب ماء غير مضطرب حيث تتوزع ببطء وبانتظـــام فـــى كـــل محتوى الكوب.

والتطبيق الأكثر شيوعًا للتفاعل الكيميـــائى هـــو ذلـــك المتعلـــق بـــالتخليق الاصطناعى synthese: معادن، وسماد وأدوية... إلخ. والاستخدام الواسع الآخـــر للتفاعل الكيميائى يرتبط بإنتاج حرارة تصاحبه غالبًا. وهذه هـــى حالـــة احتـــراق (التأكسد بأوكسجين الجو) فحم أو وقود فى مراجلنا أو فى المحطـــات "الحراريـــة" لتوليد الطاقة. وإطلاق الحرارة هذا وتمدد الغاز الناتج عنه يتم أيضا الاستفادة منـــه فى محركات سياراتنا أو فى دفع الصواريخ.

لكن للتفاعل الكيميائى خاصية يقل التفكير فيها إلى حد كبير: قدرتـــه علـــى توليد إشارات دورية فى الزمن أو نماذج منتظمة فى المكان. وترتبط هذه الخاصية مباشرة بجوانب ديناميكية للتحولات الكيميائية (وبشكل متناقض بعمليات الانتشار). غير أن هذه الظواهر تُستخدم فى "الصناعة الكيميائية" الأكثر ضخامة أكثر مما هى عليه على سطح كوكبنا، تلك المتعلقة بالكائنات الحية.

وهدف هذه المحاضرة أن نقدم لكم هذا الجانب غيـــر المعـــروف بالدرجـــة الكافية أيضا فيما يتعلق بالتفاعل الكيميائى.

بنى تبديدية

قوانين الديناميكا الحرارية قطعية، وأيًا كان تعقد تفاعل ما، ليس من الممكن وجود أى تغير زمنى أو تغير مكانى للتركيزات فى محلول ما، فى حالة التـــوازن الديناميكى الحرارى. وفى ســـتينيات القـــرن العـــشرين أثبـــت أ. بريجـــوجين I. Prigogine (الحاصل على جائزة نوبل ١٩٧٧) ومعاونوه فـــى كليـــة الـــديناميكا الحرارية فى بروكسل، بوضوح فى أى شروط يمكن لمحاليل تفاعلية تقديم ظواهر ذاتية التنظيم auto - oranisation. وهى غير ممكنة إلا إذا تغيرت المنظومة بمـــا

يكفى لتبتعد عن حالة توازنها الديناميكى الحرارى. غير أنه، كما يتغير حتمًا كل تفاعل كيميائى فى منظومة مغلقة نحو التوازن، فإن التذبذبات والنماذج الكيميائية، التى ستكون هنا مشكلة، لا يمكن أن تولد إلا عندما تكون التفاعلات لم تستهلك بعد بشكل ملحوظ متفاعلات البداية، أو عندما تكون محفوظة بعيدًا عن التوازن بإسهامات ثابتة لمتفاعلات جديدة وبإخلاء منتجات التفاعل. وفى هذه الحالة الأخيرة، يقال إن المنظومة مفتوحة. وملاحظة ظواهرنا ذاتية التنظيم تكون إذن خاضعة لاستهلاك طاقة، وهنا يتعلق الأمر بطاقة كيميائية. وتُوصف بأنها "بنى تبديدية structures dissipatives".(٧٢)

التفاعلات المتذبذبة

بعيدًا عن التوازن لا تتولد التفاعلات من بنى تبديدية. وفى هذه الحالة وحدها التفاعلات الكيميائية، التى تقدم خلالها الآليات الحركية حلقات ارتجاعية retroactions، هى التى تكون ممكنة. والحالة الأكثر بساطة لمثل هذه الحلقة الارتجاعية هى التحفيز الذاتى auto - catalyse (ويكون من المتوقع هنا أن منتج التفاعل يحفز تكوينه الخاص). ويتميز هذا النوع من الارتجاع عن المنظومات سريعة التأثر، التى "يحتدم" التفاعل داخلها. وفى المنظومات التى تنتظم ذاتيًّا من الواضح أن هذا التفاعل الارتجاعى يجب تعديله فى لحظة أو أخرى، وكبحه بعملية مضادة. ومثل تلك الآليات الحركية، حيث تدخل منافسات لعمليات حفازة وكابحة، يوجد فى فئة خاصة من تفاعلات كيميائية: التفاعلات الكيميائية المتذبذبة. إذا كانت تلك التفاعلات استثنائية فى التفاعلات غير العضوية، فإنها تكون على العكس شائعة جدا فى المنظومات الكيميائية الحيوية حيث تتحكم فى عمليات فسيولوجية أساسية وكذلك فى تنظيم هذه العمليات. ولنذكر، على سبيل المثال، تفاعلات تحلل السكر glycolyse، المحرك الطاقى للخلايا، وإنتاج الأدينوسين أحادى الفسفات

---

(٧٢) G. Nicols et I. Prigogine. Self Orcanization in Nonequilibrium Systems, Wiley (1977).

AMP الدورى لدى بعض الخلايا الأميبية amibes accrasiales، ونبضات الخلايا العقدية للقلب، وحالات النظم اليومى(٧٣).(٧٤)

وباكتشافها فى مطلع هذا القرن لم تفسح التفاعلات الكيميائية المتذبذبة فـى محلول متجانس المجال أمام دراسة كثيفة مثل ما حدث فى النـصف الثـانى مـن سبعينيات القرن العشرين، بعد أن أمكن تعلم كيفية تنفيذها فى تفاعلات مفتوحة. إلا أننا عرفنا منذ نهاية القرن التاسع عشر ظواهر تذبذبية تتضمن تفاعلات كيميائيـة، لكنها فى أغلب الأحيان كانت تتعرض لتبدلات مع وجود سـطح بينـى interface بين مرحلتين (سائل - صلب وسائل - غاز).(٧٥) وتم اكتشاف أول تفاعل كيميائى متذبذب لم يتوسط آليته سطح بينى فى ١٩٢١، بواسطة وليـام بـراى William Bray من جامعة كاليفورنيا، عند إجراء دراساته حول انحلال الماء المؤكسد بأيون اليودات iodate. وفى ذلك العصر كانت صفة المتجانس للتفاعل موضع شك مـن جانب الغالبية العظمى من علماء الكيمياء الذين لم يستطيعوا، وقد تشربوا بمبـادئ الديناميكا الحرارية للنظم المتوازنة، التسليم بأن مثل تلك التذبذبات يمكن أن تنـتج فى محاليل أحادية الأطوار monophasiques.

ولم يُقابل اكتشاف تفاعل متذبذب آخر فى ١٩٥١، بواسـطة بـوريس ب. بيلوسوف Boris P. Belousov، عالم الكيمياء الحيوية السوفييتى، بترحيب أفـضل من جانب أنداده. ولم يحدث سوى فى ١٩٥٨ أن نجح بيلوسوف فى نشر اكتـشافه فى صحيفة طبية مغمورة. لكن اكتشافه أثار الانتباه من علمـاء كيميـاء طبيعيـة وعلماء فيزيولوجيا إلكترونية روس آخرين من بينهم أناتول زابوتنـسكى Anatol Zhabotinsky، الذى كان لا يزال طالبًا شابًّا فى موسكو. وقدم هذا العالم من بـين

---

(٧٣) النظم اليومى rythme circadian: تسلسل الأحداث الذى يتكرر كل ٢٤ ساعة فى حياة المتعـضى - المترجم

(٧٤) Cellular Oscillators, eds M. J. Berridge, P. E. Rapp et J. E. Treherne, Cambridge University Press (1979).

(٧٥) S. Veil, Actualites scientifiques et industrielles. (1934)

آخرين نوعًا معدلاً من تفاعل بيلوسوف يتكون من محلول يحتوى أوليًا على أيونات ملح حامض البروميك bromate وسيريومى cereux، من حمض أبيض[٧٦] malonique، ودليل (تقليل الأكسدة red - ox) هو الفيروويين ferroine، مما يتيح الحصول على تغيرات دورية مدهشة ذات لون، أحمر أو أزرق. وهذا التفاعل الذى يحمل الآن اسم "تفاعل بيلوس – زابوتنسكى" (أو تفاعل BZ)، لا يزال أحد التفاعلات الأكثر رواجًا. وحازت هذه الصفة المتجانسة للمسار التذبذبى لهذا التفاعل اعترافًا من عدد متزايد من علماء الكيمياء خلال سبعينيات القرن العشرين، بفضل تفسير الآلية الحركية للتفاعل بواسطة ريشار نوييه Richard Noyes ومساعديه من جامعة إوريجون Oregon. ووردت قصة تطور التفاعلات المتذبذبة فى عمل حديث لكل من أ. باكول A. Pacault وج. ج. بيرود[٧٧] J. J. Perraud.

وكان قد تم اكتشاف أولى التفاعلات المتذبذبة بالصدفة البحتة. ومع أنه فى نهاية السبعينيات كان هناك متغيرات معروفة لأول تفاعلين، لم تكن هناك طريقة منهجية لاكتشاف تفاعلات كيميائية متذبذبة جديدة بالفعل. وخلال كل تلك السنوات كانت أغلب الدراسات حول التفاعلات المتذبذبة تتم فى مفاعلات مغلقة. ونعرف الآن أنه، فى مثل هذه الظروف، تصل الأغلبية الساحقة من التفاعلات إلى حالتها المتوازنة فى زمن أقصر من الفترة الزمنية للتذبذب وأنه تبعًا لذلك تكون مثل تلك المفاعلات غير ملائمة للبحث حول تفاعلات متذبذبة جديدة. ولعرض مثير للتفاعل المتذبذب (انظر الملحق ١).

مفاعلات دائمة التشغيل ومضطربة

كان فريقنا من مركز أبحاث بول باسكال Paul Pascal فى بوردو أول من استخدم بشكل منهجى المفاعلات المفتوحة فى دراسة التفاعلات المتذبذبة. ولقد

---

(٧٦) حمض أبيض مستخلص من حمض التفاح يستخدم فى صناعة البريتوريت – المترجم

(٧٧) Rythmes et formes en chimie. Que sais - je?, no 3235 (1997).

استخدمنا مفاعلات بحجم ثابت، تعمل بقوة لضمان تجانس المحاليل، ويتم تغـذيتها بشكل مستمر بواسطة محاليل المتفاعلات الجديدة، وكانت فكرة هـذه المفـاعلات مقتبسة من الهندسة الكيميائية. وفى مثل هذه المنظومات، يمكـن التوصـل إلـى السلوك المتذبذب لأى تفاعل بقدر تغذية المفاعل. ومن ثم فقد استطعنا، ليس فقـط ملاحظة العديد من السلوكيات الدورية ولكن أيضا تذبذبات غير دوريـة (شواشـية جبرية) وظواهر متعددة التوازن (ظواهر ذاكرة ديناميكية). وأتاح اسـتخدام هـذه التفاعلات المستمرة المضطربة أيضا تطوير طرق لاكتشاف العديد من التفـاعلات الكيميائية الأخرى، من بينها التفاعل بين أيونات الكلوريـت chlorite، الإيـودور iodure وحامض أبيض malonique، وهو المعروف باسم تفاعل CIMA. ولعب هذا التفاعل دورًا مهمًا فى التطورات الحديثة للبنى المكانية الكيميائية. ويمكـن أن نعد الآن نحو ثلاثين مجموعة من تلك التفاعلات بإجمالى أكثر من ثلاثمائة متغير. وهى قائمة بشكل أساسى على كيمياء المركبـات المؤكـسدة، ومولـدات الملـح halogenes، والمنجنيز، والكبريت وبعض المركبات الأزوتية.(٧٨)

الموجات الكيميائية
والمفاعلات "المكانية المفتوحة"

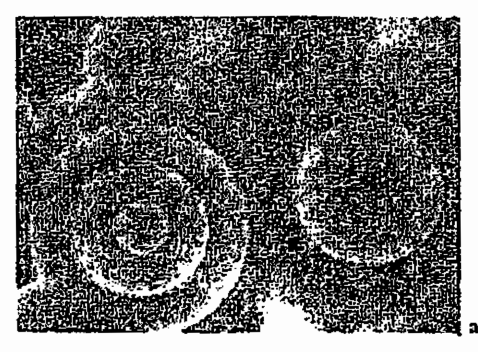
من السهل إلى حد كبير تخيل أنه عندما لا يعود محلول كيميـائى متذبـذب موحدًا بسرعة بواسطة المزج الميكانيكى، يمكن، على الأقل مؤقتًا، الحصول علـى طور آخر بين النقاط المختلفة للمنظومة التفاعلية ومن ثم توليد موجة ذات طـور. وتسبب هذه الموجة تركيزات محلية مختلفة، يمكنها أن تكون ذات أهمية إلى حـد بعيد. ومن حيث المبدأ، يجب أن يمحو الانتشار الجزيئى هذه الاختلافات بالتـدريج ويجب أن يتذبذب المحلول، فى النهاية، على نمط واحد، بدون تغير فـى الطـور، لكن حالات عدم التجانس المكانى تلك لا تتناقص دائمًا ويمكن لموجات أن تـستمر

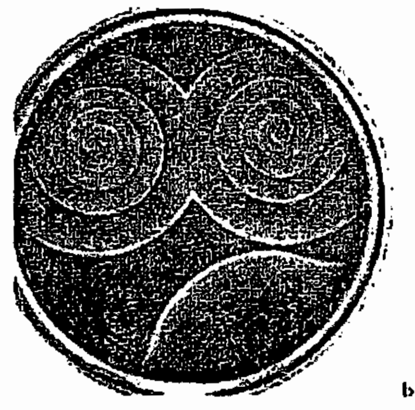
---

(٧٨) Oscillation and Travelling Waves in Chemical Systems, eds. R. J. Field et M. Burger, Wiley interscience (1985).

زمنًا طويلاً مثل أن تتغير المنظومة التفاعلية لتصبح بعيدة عن التوازن بما فيه الكفاية. وفى حالات معينة ترتبط هذه الموجات بخواص شديدة الاسترخاء لحالات متذبذبة معينة أو لحالات ساكنة مجاورة لهذه الحالات المتذبذبة. وتكون آلية الانتشار بدون إضعاف هذه الموجات مصحوبة بظاهرة تضخيم كيميائى محلية لتغيرات التركيز، وتُستحث هى نفسها تدريجيًا بواسطة الانتشار. وقياسًا على انتشار حافز على طول محول عصبى يتم وصف هذه الموجات بأنها "موجات انفعالية excitabilite". وعندما تُصب مخلوطات مناسبة من التفاعل BZ (انظر الملحق ٢) فى طبقة رقيقة فى وعاء بيترى Petri يمكن للموجات الانفعالية تلك أن تكوّن نماذج سيان على هيئة "هدف cible" (الشكل ١ أ) تبتعد فيه الحلقات عن المركز بينما تظهر نواة أخرى، بشكل دورى، فى مركز "الهدف"، أو على هيئة لولب أرشميدس Archimede (الشكل ١ ب) الذى يتم الحصول عليه بانقطاع اختيارى أو غير اختيارى لجبهة موجة دائرية. ولكن فى هذه التجارب فى المفاعل المغلق يتطور الوسط حتمًا نحو حالة توازنه الديناميكى الحرارى وتختفى الموجات فى بداية زمن أكثر أو أقل قصرًا. وفى هذه الأحوال يمكن فقط للخواص، الأكثر بساطة أو الأكثر شدة، لدفعات الموجات، أن تُختبر.

وابتداء من وسط ثمانينيات القرن العشرين، كان هناك عدد قليل من الفرق ومنها فريقنا قد بدأ معرفة وإنشاء مفاعلات مكانية مختلفة مفتوحة. وأصبحت تستجيب لشرطين واضحى التناقض: التغذية بلا انقطاع بمخلوطات تفاعلية من المتفاعلات الجديدة، فى كل النقاط، وتجنب إيجاد سيلانات سوائل كانت تخل بنظام التحول الانتشارى للجزيئات. وتم حل هذه المشكلة بالعمل فى مفاعلات منشأة بواسطة كتل رقيقة من الجل الهيدروجينى hydrogel (على هيئة شريط، لنواة أو قرص) يتم تغذيتها من الداخل بانتشار المتفاعلات انطلاقًا من أسطح متقابلة تتماس مع خزانات المتفاعلات التى يتم تجديدها باستمرار. ولنتذكر أن الجل يتكون بشكل عام من





الشكل (١)

موجات تأكسد تنتشر فى محلول لتفاعل بيلوسوف - زابوتنسيك BZ

بشروط أن يكون هذا المحلول قابل للاستثارة:

أ) بنى على هيئة "أهداف". ب) بنى على هيئة لوالب يتم الحصول عليها

بعد انقطاع جبهة موجة.

(صورة أ. ت. وينفرى A. T. Winfree)

شبكة أكثر أو أقل ارتخاء من سلاسل طويلة مجدولة من البوليمرات polymeres، والمجموعة منفوخة بمذيب (مثل ما هو موجود فى جيلاتيناتنا gelatines الغذائية). وفى حالتنا يكون البوليمر سيان من الأجاروس agarose أو من متعدد الأكريلاميد polyacrylamide بينما يكون المذيب هو الماء. وتتيح لنا رقة حلقـات الجـل أن

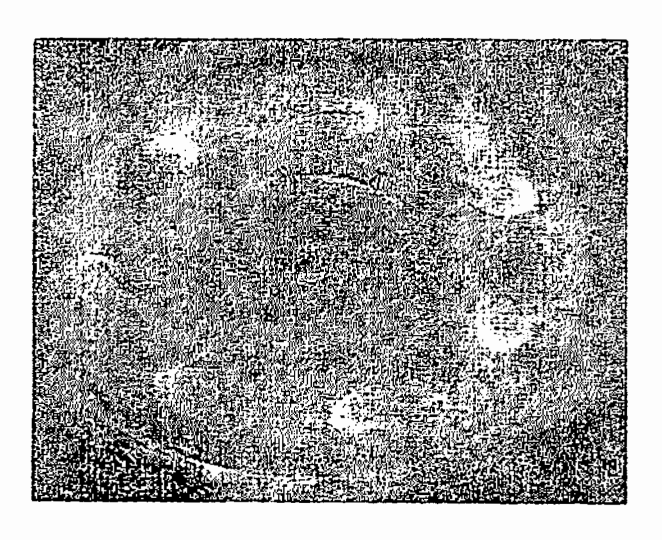
نتخلص من كل الحركات الشديدة ناقلة الحرارة بالحمل بـــدون أن تحـــدث إعاقـــة لعمليات الانتشار.

وأول تفاعل متذبذب تمت دراسته في هذا النوع من المفـــاعلات المفتوحـــة كان تفاعل BZ. وأوضحت دراسات أجريت في جامعـــة أوســـتن Austin، فـــى مفاعلات مفتوحة تتكون من أقراص رقيقة من الجل، التعقد غير المألوف لديناميكا أوساط الموجات اللولبية، وهى ديناميكا معروفة سابقًا منذ عـــدة ســـنوات بالنـــسبة لعلماء النظرية لكن كان من الصعب التحكم فيها فى التجارب السابقة. ومن جانبنـــا درسنا بهذا التفاعل أشكالاً جديدة من موجات الحث فى مفاعل يتكون مـــن حلقـــة مستوية من الجل. وكانت تلك الأشكال حينئذ على هيئة حدوة تدور علـــى الـــدوام دائريًا بطول الجزء الأوسط من الحلقة، كما هو موضح فى الشكل ٢. ولقد أطلقنـــا على هذا النوع من موجات الحث الدائرة مثل ميـــدان فروســـية "بغيـــر أعاصـــير excyclons". وتكون تلك الموجات عامة بشكل متماثل وتتوزع بطريقة متـــساوية الأبعاد بطول الحلقة. غير أن تماثل المجموعة يمكن أن يكـــون أقـــل مـــن عـــدد الموجات بل قد يتغير خلال الزمن بطريقة معقدة جدا.

التصميمات الكيميائية الساكنة

كل التصميمات motifs الكيميائية التى تتحرك تقوم على عـــدم اســـتقرار، تعمل فى الزمن لكنها توجد بآليات آخرى ذاتية التنظيم تكون مستقلة عـــن الـــزمن وتولّد تصميمات كيميائية ساكنة. وتم اقتراح مثل تلك الآلية للظهور التلقائى لبنـــى مكانية كيميائية ساكنة، بوضوح للمرة الأولى فى ١٩٥٢ بواسطة عالم الرياضيات الإنجليزى آلان تورينج Alan Turing، فى ذكرى مازالت مشهورة حملت عنـــوان "القواعد الكيميائية للتشكل morphogenese". ويعتبر آلان تورينج قبل كل شـــيء مشهورًا بفكه لرموز الشفرات السرية لجيوش الرايخ Reich الثالث. ولهذا الهـــدف كان قد عرف وأنشأ، فى ١٩٤٣، أول حاسب إلكترونـــى، كولوســـاس Colossus. ولإنجاز ذلك ولإجراء دراساته عن المنطق، استحق عن جدارة أن يلقب بأحد آبـــاء

المعلوماتية. وبفضل مقالته فى ١٩٥٢ المذكورة آنفا، يعتبر الان تورينج أيضا أحد آباء البيولوجيا النظرية المعاصرة. وفى هذا العمل، اقترح تورينج آلية بارعة لظهور الأشكال قائمة على تآزر بين تفاعلات كيميائية وسياقات انتشار.



الشكل (٢)

إكس سايكلون (بغير الأعاصير) excyclons: دفعة سبع موجات لحث التفاعل BZ.
تدور إلى ما لا نهاية فى مفاعل على شكل حلقة مسطحة
ويتم تغذيته بالمتفاعل بواسطة انتشار انطلاقا من حوافه الداخلية والخارجية.

وسر البنى التى اقترحها تورينج تكمن فى الحركى غير الخطى للتفاعل المصحوب باختلافات انتشارية الأنواع الكيميائية المستخدمة. وبشكل أدق، يجب أن ينتشر الكابح inhibiteur بسرعة أكبر من المنشط activateur. وتلك الشروط، التى يصعب جمعها فى أوساط كيميائية كلاسيكية، تكون شائعة فى المنظومات البيولوجية حيث المسارات ذاتية الحث والكابح تكون هى القاعدة، وحيث بعض الجزيئات تنتشر بصعوبة أكثر من الأخرى بسبب اختلافها الكبير فى الكتلة أو تفاعلها القوى مع الوسط. وتنتج البنى الساكنة التى يتم الحصول عليها من موازنة

متوازنة (من "توازن ديناميكى") بين سرعة التحويل الكيميائى وسرعة انتشار مكونات التفاعل. وليست هذه بنى توازن، كما هو الحال مع البللورات. وعند التوقف عن المد بالمتفاعلات، ينضب التفاعل، وتسترد صفة التجانس حقوقها وتنطمس البنى.

وكل التفاعلات الكيميائية المتذبذبة يمكنها بشكل مسبق أن توفى بالشروط الحركية الضرورية لظهور بنى تورينج، غير أنه فى كل التفاعلات غير البيولوجية المعروفة تكون الأنواع المستخدمة ضئيلة الكتلة الجزيئية، ويكون لها جميعًا، فى المحلول، عامل انتشار بمقدار ١٠^-٥ سم٢/ ثانية. والفرق الضرورى بين معاملات الانتشار للمركبات المنشطة والكوابح لا يمكن من ثم الوفاء به مباشرة. ولحسن الحظ فإنه فى المنظومات الكيميائية التى يكون لها أكثر من متغيرين لا يكون الشرط مقيدًا بقدر ما. وفى الواقع، يكفى أن يكون "الانتشار الظاهرى" للمنشط أكثر ضعفًا من ذلك الخاص بالكابح. ولم يكن هذا الغموض قد ظهر بوضوح قبل أول إثبات تجريبى لبنى تورينج فى ١٩٨٩، بواسطة فريقنا بما يقرب من أربعين عامًا بعد تنبؤ تورينج بها.[٧٩]

ونعرف الآن أن آلية تورينج تقوم على تنشيط محلى مقترن بكبح ذى مدى طويل وهى فى الواقع آلية شائعة كثيرًا فى العديد من المجالات الأخرى غير الكيمياء. وهى تعطى تفسيرًا بسيطًا لعدد كبير من التصميمات التى نلاحظها فى الطبيعة وفى المختبر. وعدم الاستقرار المبدع هذا يكسر تماثل انتقالية الحالة الأولية لتوليد تنظيم ذاتى مكانى. وتقدم منظومة بهذا الحجم نفسها على شكل صف أعمدة لمنشط متباعدة بشكل منتظم. ويتم تحديد المسافة المتوسطة بين الأعمدة ببارامترات ذاتية مثل تلك الخاصة بالثوابت الحركية أو معاملات الانتشار. وتميز هذه الخاصية بنى تورينج عن عدد كبير من البنى المبددة dissipatives مثل الخلايا الحاملة للحرارة التى تُلاحظ فى علم القوى المائية hydrodynamique

(٧٩) Chemical Waves and Patterns, eds R. Kapral et K. Showalter, Kluwer Academic Publisher (1994).

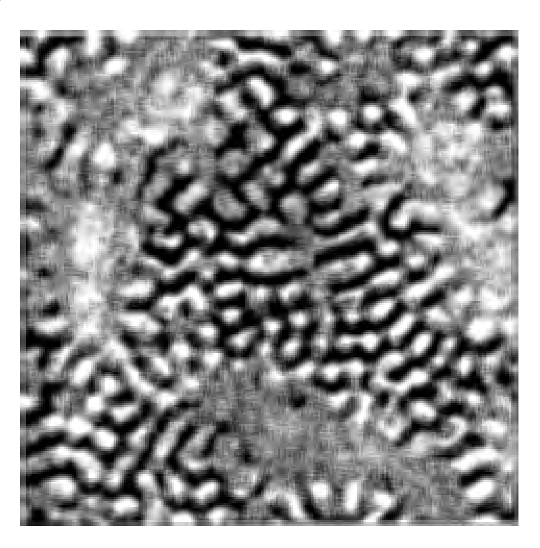
حيث يتحدد طول موجة مميزة بالأبعاد الهندسية للمنظومة. وتبعًا لبعد المكان يكون من المحتمل وجود تنوع أكثر أو أقل ضخامة من الحلول الهندسية. وفى البعدين يمكن أيضا بشكل جيد وجود بقع سريعة الحضور على هيئة تصميمات سداسية أكثر من أن تكون على هيئة أشرطة. وفى الأبعاد الثلاثة، تكون البنى التى تم التنبؤ بها نظريًا ذات صفائح متوازية، وشبكات لسداسيات منشورية لأعمدة مثل "بللورة كيميائية تبديدية" تحتل فيها النهاية العظمى للتركيز عقد شبكة مكعبة متمركزة. ويمكن لهذه التنظيمات المكانية فائقة الجزيئية supra - molecolaires أن تظهر أيضا فى منظومات توازن ديناميكية حرارية كما تظهر فى بوليمرات polymeres المخلوطات أو بللورات السوائل لكن فى هذه الحالة، يكون حجم التصميمات مرتبطًا بشدة بأبعاد جزيئات مركبة. وبالعكس ليس للبنى الكيميائية لتورينج Turing أى علاقة كبيرة مع تلك الخاصة بالجزيئات المستخدمة!

وفى التفاعل CIMA، الذى تم استخدامه فى أول إثبات لبنية تورينج، كانت الأنواع التى لعبت الأدوار الرئيسية للمنشط والكابح هى على التتالى أيونات اليودور iodure ions وأيونات الكلوريت chlorite. وتم تشريب الجل بالنشاء، المؤشر الملون الذى يكوّن، فى وجود اليود iode واليودور، مركبًا أزرق عندما يتجاوز تركيز اليودور حدًا معينًا. غير أن النشاء يعتبر جزيئًا بالغ الضخامة يبقى محصورًا بين حلقات الجل، وتعتبر انتشاريته أيضا أقل بكثير من تلك الخاصة بالأنواع الأخرى المتذاوبة solvatees. وعندما يصبح اليودور مركبًا مع النشاء تتناقص انتشاريته الفعالة الموجودة فيه بشدة بالنسبة للأنواع الأخرى ذات الكتلة الجزيئية القليلة، بدون تفاعل مع النشاء، وتنفتل الحلقة: فى الواقع يقدم التكوين الانتقائى لمركب انعكاسى وثابت لمنشط التفاعل المتذبذب، فرق الانتشارية الضرورى لظهور بنى تورينج. وأنتجت التجارب، التى أجريت فى مفاعلات "ذات قرص من الجل" من بين ما أنتجته الشبكات السداسية الرائعة للبقع أو الشرائط المتوازية التى تنبأت بها النظرية، مثل تلك الموضحة فى الشكل ٣ (انظر خارج النص). وتم تطوير هذه التنظيمات تلقائيًا فيما وراء قيمة حرجة للتركيزات فى

فيض التغذية للخزانات حيث تكون المحتويات متماسة مع قطعة جل. وتصبح متجانسة مع التغذية الموضوعة على سطحى القرص حيث تتطور داخله ظاهرة متميزة لبنى تنبأ بها تورينج.

التقطعات المكانية الزمنية والأزهار الكيميائية

تتيح المنظومات الكيميائية، من ناحية كفاءتها فى الانتظام التلقائى معًا فى الزمان والمكان، مجموعة بالغة الثراء من المسارات الممكنة، بسبب التفاعلات بين الأنواع المختلفة من التنظيمات الذاتية. ويمكن للتفاعل CIMA، أن ينتج ليس فقط بنى ساكنة لتورينج، ولكن أيضًا، بقيم مختلفة لبارامترات كيميائية، وبنى موجات. وحالتا عدم الاستقرار هاتان يمكنهما احتلال مجالات مجاورة للرسم البيانى لحالة



الشكل (٤)

تقطع مكانى زمنى: نموذج غير منتظم

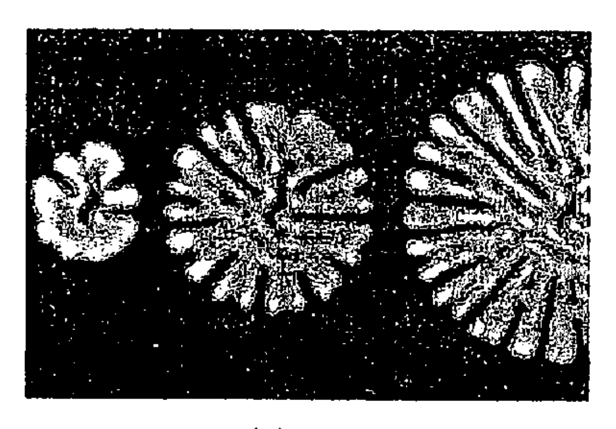
فى حركة دائمة، ناتج عن تآزر بين عدم استقرار مكانى لتورينج

وعدم استقرار متذبذب فى التفاعل CIMA الذى تم فى مفاعل مكانى مفتوح.

منظومة التفاعل - الانتشار. وبجوار التخوم بين هذين النوعين للبنى، يمكن

لحالات عدم الاستقرار المكانى والمتذبذبة، أن تتحد لإدخال مسارات ديناميكية مبتكرة حيث تتقاسم الذبذبات والبنى الساكنة المكان، بطريقة احتمالية ظاهريًا فى الزمان وفى المكان، لتوليد ما يطلق عليه الاختصاصيون التقطع المكانى الزمنى intermittence spatio - temporelle. ويوضح الشكل ٤ منظرًا لحظا لمثل هذا التوزيع حيث المناطق المتذبذبة فقط، التى تبدو ملساء، متشابكة مع مناطق بنيوية لتورينج عند التنظيم شديد الاضطراب.

ونعرف أيضا أن المنظومات الكيميائية ذات التفاعلات توجد غالبًا بكثرة، عندما يتم إجراؤها بعيدًا عن التوازن، من حالات استقرار ثنائية bistabilites بين حالات تجانس مختلفة. وفى هذه الحالة يمكن أن تظهر أنواع أخرى من التنظيمات المكانية وتتحدد مع عدم الاستقرار لتورينج وتُحدث سيان زيادات فى البنى بانقسام البقعة، مما يذكرنا بالانقسام الخلوى، أو انتشار نماذج زهرية رائعة عابرة عند نشوء بنية لتورينج فى الشرائط (الشكل ٥).



الشكل (٥)

تصميم زهرى يظهر فى قلب تطور بنية تورينج
على شريط فى شروط تتفاعل خلالها حالة عدم استقرار تورينج
مع حالة عدم استقرار أخرى "عدم الاستقرار الجانبى للجبهة".
والصور المتتالية تناظر نفس النموذج للمراحل المختلفة لتطوره.

الشمولية والتصميمات البيولوجية

التنويعة الواسعة جدا للظواهر ذاتية التنظيم التلقائية فى المنظومات الكيميائية تكافئ بكرم الباحثين الذين ينكبون على ديناميكية هذه المنظومات البعيدة عن التوازن. وبعيدًا عن إنتاج صور جميلة، فإن دراسة التصميمات motifs الكيميائية تتيح أيضا الاقتراب من السؤال الأكثر فلسفية حول شمولية الأشكال التى تظهر فى الطبيعة. ونلاحظ بالفعل أن العديد من التنظيمات المكانية والزمنية تخضع فى الطبيعة غالبًا لنفس التماثلات (تصميمات على فراء الثدييات أو على المحارات، واللوالب فى انتظام الأوراق على الساق phylotaxie). ومن المغرى التفكير فى أن كل هذه المسالك تتحكم فيها نفس القوانين الأساسية. ولا يجب بالتأكيد الإفراط فى التعميم. ومع ذلك من المؤكد أن الآليات الموصوفة هنا والتى تضم حالات عدم الاستقرار المبدعة لأشكال توجد فى مجالات أخرى غير منظومات التفاعل - الانتشار. وبالفعل يكون لعمليات التنشيط والكبح على أساس تصميمات كيميائية نظائر فى مجالات متنوعة أيضا مثل علم القوى المائية hydrodynamique، وعلم البصريات، والتحفيز غير المتجانس وأشباه الموصلات مثلاً. وبالمثل يمكن عند التوازن الديناميكى الحرارى، أن يولّد التنافس بين القوى المتعارضة مثل الجذب على المدى القصير والدفع على مسافات طويلة، تصميمات على شكل متاهة كما نلاحظ فى الشرائط المغناطيسية وطبقات السوائل الحديدية ferrofluides. والفكرة الموحدة لهذه الملاحظات المتنوعة هى تلك الخاصة بكسر التماثل: والذى يوضع فى الاعتبار أولاً هو انخفاض عدد تماثلات منظمة بعيدًا عن المرحلة الوسيطة. وتفصيل الآلية الفيزيائية أو الكيميائية أو غيرها القائم أساسًا على عدم الاستقرار يصبح حينئذ ثانويًا لأن البنية الجديدة يمكن وصفها بمصطلحات السعة amplitude الوحيدة للبنية الدورية بالنسبة لسعة حالة تناسق المصدر. وتصف المعادلات الرياضية تغير هذه السعة آخذة شكلاً شاملاً يعتمد فقط على أنواع تماثل محطمة عندما تصبح المنظومة المتناسقة والساكنة غير مستقرة. وهذا أمر سحرى، إلى حد ما، أن نستطيع بهذه الطريقة توحيد التنظيم الذاتى لمنظومات مختلفة إلى حد بعيد

بتعبيرات نفس التشكلية formalisme. غير أننا نلاحظ، في التفصيل، أن المنظومات المختلفة يمكن أن تقدم نوعياتها، لكن يجب حينئذ التعمق في التحليل.

ويجد تخليق أشكال في المنظومات الكيميائية اهتمامًا واسعًا في كل التطبيقات التي تتضمن تفاعلية تكون خاصية للتموضع في منظومة معطاة. ولا يجب أن ننسى أن الكيمياء، وسنقول عمومًا الكيمياء الحيوية، هي المستخدمة لدى الكائنات الحية، ويومئ العديد من الباحثين إلى أن عمليات التفاعل - الانتشار تلعب دورًا في تطور الأشكال والتصميمات لدى الأجنة، وهو ما يُطلق عليه تشكل الكائن الحي[٨٠] morphogenese. وهذه الفكرة كانت من جانب آخر حافزًا أوليًا لدى تورينج.

في الأجزاء الأكثر اكتسابًا للشعبية في أعمال ج. د. موراي J. D. Muray، وهو عالم رياضيات بريطاني آخر، بذل قصارى جهده في أن يأخذ في اعتباره تنوع التصميمات في فرو الثدييات: مثلاً تخطيط الحمار الوحشي، وبقع النمر. وبالنسبة إليه قد يكون التنظيم على هيئة بقع أو شرائط مرتبطًا بتوزيع مكاني لتركيز تخلّق ما. وقد يكون هذاالتوزيع ناتجًا عن عدم استقرار للتفاعل - الانتشار من نوع تورينج ويتكون من تصميم مسبق، تكوّن مبكرًا جدا خلال التطور الجنيني. وتجمد ذلك التصميم ثم "قُرأ" في مرحلة لاحقة. ولم يكن أمام التصميم النهائي على فرو الثدييات إلا أن يعكس هذا التصميم المسبق: ولعل قوة أو ضعف تركيز التخلّق morphogene، تبعًا لموضع معين في التصميم المسبق، تؤثر على التموضع اللاحق للخلايا السُحاميَّة melanocytes (خلايا إفرازية لصبغة القُتامين[٨١]).[٨٢] ويقارن الشكل ٦ (انظر خارج النص) تصميمًا كيميائيًا معقدًا يمكننا إنتاجه بسهولة في مفاعلاتنا المكانية المفتوحة بتصميمات فرو نمر، والتشابه يكون أحيانًا جذابًا.

---

(٨٠) تشكل الكائن الحي، أو تطور أشكال وبنى متميزة للكائن المتعضي. (المترجم)

(٨١) القُتامين melanine: صبغ قاتم موجود في الجلد والشعر والمادة السوداء في الدماغ. (المترجم)

(٨٢) J. D. Murray, Mathematical Biology. Springer (1993).

وبطريقة مشابهة استطاع هانس مينهاردت Hans Meinhardt، عالم البيولوجيا النظرى الألمانى، أن ينتج بواسطة تشابه مذهل التصميمات الأكثر تعقيدًا التى تُلاحظ على تنويعة واسعة من المحارات انطلاقًا من نماذج تفاعل - انتشار قائمة على ما هو معروف فى فسيولوجيا اللافقاريات وفى آليات إفراز المحارات والصبغات.(٨٣)

وما يمكن أن تكون عليه التشابهات هو أمر محير أيضا، فهى لا تقيم براهين لآليات مستخدمة. وكما رأينا، فإن الصفة الشاملة لحالات عدم التوازن التى تكسر التماثلات لا تسمح بأن تُرجع إليها بطريقة أحادية المعنى آلية خاصة، ولكن يبدو النموذج الرياضى أو التجريبى فقط من نفس نوع عدم الاستقرار. ولا يمكن اعتبار المداخل بمصطلحات منظومات التفاعل - الانتشار لمنظومات بيولوجية إلا كمداخل حد أدنى أو مداخل مبسطة تقوم بدور الداعم للتفكير. وهناك فى المنظومات البيولوجية الحقيقية آليات فيزيائية معروفة للتدخل فى عمليات تشكل الكائن الحى مثل ما يحدث في التوتر السطحى، ومرونة النسيج، والضغط الشعرى capillaire، والمجالات الكهربائية والمجال الجاذبى. وكل الأشياء التى يمكنها أن تعيد المنظومة أيضا إلى أن تكون غير خطية بدرجة أكبر توسع من ثم بشكل خاص الطرق المختلفة لأن تنتظم هذه المنظومات تلقائيًا في الزمن وفى المكان. والكلمة الأخيرة لعلماء البيولوجيا لمعرفة هوية الأزواج المتعارضة التى تؤثر على التتالى كمنشط محلى وككابح على المدى الطويل: وهو عمل مازال بعيدًا عن التحقق.

ملحقان: تجربتا كيمياء

وصفة ١: التفاعل الكيميائى المتذبذب. تم اقتراح هذا التفاعل للمرة الأولى بواسطة ت. س. بريجس T. S. Briggs وس. و. روشيه(٨٤) C. W. Raucher

(٨٣) H. Meinhardt, the Algorithmic Beauyt of Sea Shels, Spriger (1995).
(٨٤) T. S. Briggs et C. W. Raucher, J. Chem. Educ., no 50, 1973, pp. 496.

وينتج من تغيرات دورية مدهشة فى لون عديم اللون أو أصفر مائل للاحمرار ثـــم أزرق. جهّز المحاليل الثلاثة القاعدية التالية ثم اخلط أحجام متـساوية مـن هـذه المحاليل الثلاثة فى قارورة:

- المحلول ١ - ماء مؤكسج [H_2O_2] = ٣,٢ M + حمض فـوق كلـوروري perchlorique [$HClO_4$] = ٠,١٧ M.
- المحلول ٢ - حمض أبـيض malonique [$CH_2(COOH)_2$] = ٠,١٥ M + سلفات المنجنيز [$MnSO_4$] = ٠,٠٢٤ M + [Thiodene] = ٢٠ جم / لتر، مؤشر ملون لقياس اليود iodometrie المشتق من نشاء مـصنوع بواسـطة برولابو Prolabo.
- المحلول ٣ - يودات البوتاسيوم [KIO_3] = ٠,١٤ M.

لا تسد القارورة خلال التجربة لأنه سيحدث انطلاق قوى للأوكسجين.

وصفة ٢: بنى مكانية - موجات قابلة للتهيج للتفاعل BZ. بنى "أهـداف" أو "لولبية" يمكن الحصول عليها بخلط المحاليل التالية، بالنـسب المـشار إليهـا فـى التعليمات:

- المحلول ١ - ملح حامض بروميك bromate البوتاسـيوم [KbrO3] = ٠,٦ M + حمض الكبريتيك [H2SO4] = ٠,٦ M.
- المحلول ٢ - حمض أبيض malonique [$CH_2(COOH)_2$] = ٠,٤٨ M.
- المحلول ٣ - برومور bromure البوتاسيوم [KBr] = ٠,٠٠٧ M.
- المحلول ٤ - الفيرووين ferroine، مؤشر تقليـل الأكـسدة redox محلـول تجارى عند ٠,٠٢٥ M.

وبالخلط في قارورة بالأحجام التالية (بالسنتيمتر المكعب) لمحاليل ١٤ إلـى ١,٧ إلى ٢,٢ إلى ٣. سد القارورة. يتكون حينئذ بروم brome يسهل التعرف عليه بلون أسمر. واصل التحريك حتى اختفاء كل التلوين الأسمر ثـم أضـف فقـط ١ سنتيمتر مكعب من ٤. اقلب المزيج الأحمر الداكن فى طبقة رقيقة (سـمكها نحـو

امم) فى إناء بترى Petri. غطِّ العلبة مرة أخرى بلوحة شــفافة لتجنــب تيـــارات الهواء. لاحظ الموجات الزرقاء الظاهرة بعد بضع دقائق. "فتت" هــذه الموجـــات للحصول على اللوالب.

دراسة المادة على كل المستويات[٨٥]

بقلم: مارى-بول بيلينى

Marie-Paule PILENI

ترجمة: عزت عامر

مقدمة

المادة على كل المستويات تعتبر موضوعًا ضخمًا يحتاج إلى معرفة شاملة بالعلم، وهو أمر مستحيل فى وقتنا الراهن. ومن الواضح أيضا أنه فى بضعة أسطر، لا يمكن لهذا المدخل إلا أن يكون جزئيًا. وسوف نحصر أنفسنا فى إطار الكيمياء ونحصر كلامنا فى تركيب العناصر.

ويُطرح سؤالان: ما المادة وما المستويات؟

فيما يتعلق بالمادة، بالنسبة لعالم كيمياء، فإنها اشتراك العناصر فى التصنيف الدورى. ولقد رتب منديلييف Mendeleiv الذرات حسب الرقم الذرى (أى حسب الكتلة) المتزايد. وقدم مفهومًا ثانيًا للتنظيم، وهو تشكل الطبقة الأخيرة الإلكترونية للذرات. ومن ثم فإن كل الذرات، على طول نفس العمود، لها نفس السحابة الإلكترونية الخارجية. وكان هناك مداريات ذرية من النوع s و p و d و f. والذرات فى الطبقة الأخيرة التى لها مداريات من النوع d يطلق عليها "عناصر تحولية element de transition" مثل الألومنيوم والنحاس والفضة... إلخ.

ويمكن أن يكون المستوى هو التطور الزمنى أو البعدى. وأقصر مدة زمنية تُرصد تجريبيًا فى الكيمياء هى الفمتوثانية femtoseconde ($١٠^{-١٥}$ ثانية). وتتيح تلك الدقة فهمًا جيدًا للآليات التفاعلية، مثل تلك الموجودة مثلاً عند التخليق الضوئى photosynthese. والبعد المهم الأكثر صغرًا بالنسبة لعالم الكيمياء هو الأنجسروم

(٨٥)نص المحاضرة رقم ٢٣٨ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٥ أغسطس ٢٠٠٠.

Angstrom (١٠ ⁻¹⁰ متر). ومن ثم سنضع في اعتبارنا تطور المادة من الأنجستروم إلى بضع ملليمترات (٠,٠٠١ متر).

وقبل كل شيء سنقدم بعض التعريفات.

تتكون المادة العضوية في جانبها الأساسي من ذرات هيدروجين، وأزوت، وكربون، وأوكسجين وفسفور. وأحد التركيبات الأكثر شهرة هو الدنا ADN. وهو يتكون من جديلتين (طوقين من الحبيبات) تلتفان. وكل جديلة عبارة عن تتالي ذرات تتشارك في روابط قوية يقال إنها متكافئة إسهاميًا covalentes. وترابط الجديلتين يصبح ممكنًا بفضل أربطة ضعيفة.

والمادة غير العضوية هي ترابط ذرات ينجم عن العناصر التحولية.

وتتطابق الحالة المتكتلة لمادة ما مع شكلها الأكثر استقرارًا في درجة الحرارة العادية والضغط الجوي (سبيكة الذهب، أو عقد الذهب أو ماء الصنبور تعتبر موادًا في حالة متكتلة).

وعندما يكون تفاعلاً كيميائيًا ممكنًا حسب قوانين الفيزياء، من المستحيل التنبؤ باللحظة التي سيحدث فيها. وهناك عناصر تسمح بالتقليل من زمن حدوث التفاعل ونهايته: وهي الحفّازات. وتُستعاد في نهاية التفاعل الكيميائي. حينئذ يقال إنها "تحفيزية catalysee". ويوجد الحفّاز بنسب متناهية الصغر. لنأخذ مثلاً للبلاتين وهو الحفاز الأوسع استخدامًا في السيارة. يعتبر البنزين هيدروكربور (مكون من الكربون والهيدروجين). وعند احتراقه يتكون من أكسيد الكربون CO، وهو مركب سام بدرجة كبيرة. ويتم تحفيز تأكسد CO إلى غاز كربوني CO_2، بواسطة بلاتين موضوع في أوعية حفزية.

ونحن نبحث عن إجابة لسؤالين:

– لنفس تركيب الذرات، هل تستطيع جزئيات عضوية أو عناصر غير عضوية أن توجد على مستويات مختلفة وإلى ماذا، في هذه الحالة، تتغير خصائصها المميزة؟

– هل يمكن استخدام تركيب عضوى لصناعة هوية جديدة عضوية أو غير عضوية؟

سنعالج أولاً التركيب غير العضوى ثم العضوى. وفى كل حالة سنضع فى اعتبارنا هوية مفردة وسنوضح خصائصها المميزة. وفى موضع ثان سنشرك هذه الهوية مع نفسها ونوضح أن هذه التركيبات لها خصائص مختلفة جدا عن الهوية المفردة.

تركيب العناصر غير العضوية فى مستويات مختلفة: الخصائص المميزة

الهوية المفردة

يتيح ترابط الذرات صناعة مواد صلبة مثل أشباه الموصلات، أو معادن أو سبائك. وفى الحالة المتكتلة، تكون المواد مشكلة من عدة آلاف من الذرات. وفى بداية القرن، كان يتم التصدى للمادة من الجانب الأساسى بدارسة الذرة. ولم يكن كل شيء مفهومًا فى ذلك الحين، لكن لدينا فى الوقت الراهن معرفة جيدة بالذرات. ومنذ نحو عشرين سنة تصدى الباحثون لدارسة سلوك بعض الذرات المترابطة بين بعضها البعض. وتم الشروع فى العديد من الدراسات سواء النظرية أو التجريبية. ومنذ نحو عشر سنوات يهتم الباحثون بتركيبات أكثر ضخامة (إلى حد ١٠٠ ذرة أو أكثر). ويعود ذلك من الجانب الرئيسى إلى حقيقة أنه من الممكن صناعتها بكميات كبيرة بما فيه الكفاية ومن ثم من المحتمل استخدامها فى مجال التطبيقات. سنقدم إذن مرتبتين من الحجمية. الأولى ترتبط بالتركيب الذى يكون فيه عدد الذرات أقل أو مساو لعدد ١٠٠، والثانية تتعلق بعدد ذرات يتضمن ما بين ١٠٠ وأكثر من ١٠٠٠٠.

وتتحكم ثلاثة عوامل أولية[٨٦] فى خصائص مادة ما:

– تشكل morphologie الهوية.

– نسبة عدد ذرات لسطح على الحجم.

لنأخذ سبيكة ذهب ونتأمل ذرة فى وسطها. يتبلور الذهب تبعًا لـشبكة مكعبـة على شكل متمركز. تكون الذرة التى نبحث أمرها محاطة إذن بعدد ١٢ ذرة مجـاورة. ويُقال إن الذرة هى ذرة ذات حجم وتنسيقها الترابطى coordinence هـو ١٢. فـإذا نظرنا إلى ذرة تقع على سطح السبيكة، لن تكون بعد محاطة بجيرانها الـ ١٢ ولكـن بعدد أقل من الذرات. ويُقال إنها ذرة سطحية بتنسيق ترابطى أقل من ١٢.

– وبُعد الهوية، هو الذى يحكم خصائـصها الإلكترونيـة. وليـست فقـط الخصائص المميزة للمادة، مثل، مثلاً، الطاقة الضرورية لانتزاع إلكترون (طاقـة التأين)، أو الخصائص الحفزية ولكن أيضا الخصائص البصرية والمغناطيسية.

وتتدخل مجموعة هذه العوامل بطريقة متزامنة أو متوالية. ولا يوجد قـانون عام يأخذ فى اعتباره الخصائص المميزة لمادة تبعًا لبعدها.

الهويات المؤلفة من عدد ذرات
يتراوح بين ١ و ١٠٠

يمكن لذرة أن تترابط مع ذرة ثانية لتكوين خليط يتكون من ذرتين. وارتباط ذرة ثالثة يُوجِد خليطًا جديدًا وكذلك سلسلة. يمكن إذن صناعة خلائـط (أو تكتـل) بعدد من الذرات القريبة. ويتم صنع هذه التكتلات بالتبخر فى الفراغ، ويتبعه انتقاء فى الحجم. وفائدة صنع مثل تلك الهويات للذرة القريبة يقوم بشكل خاص على فهم الفيزياء الأساسية للمادة.

---

(٨٦) Henry (C.), Chapon (C.),Giorgio (S.) et Goyhenex (C.), Chemisorption and Reactivity of Clusters and Thin Films, NATO, ASI (2000). Henry (C.). Surface Science Reports 31, 231, (1998).

ويعتمد تشكل تلك التكتلات على نوع المادة التى يتكــون منهــا. ويوضــح الشكل ١ أنه، بالنسبة لنفس عدد الذرات، تكــون تكــتلات البلاتــين والبــالاديوم Palladium مختلفة فى شكلها.

Platine		Palladium
	N = 13	
	N = 20	
	N = 30	
	N = 55	

الشكل (١)

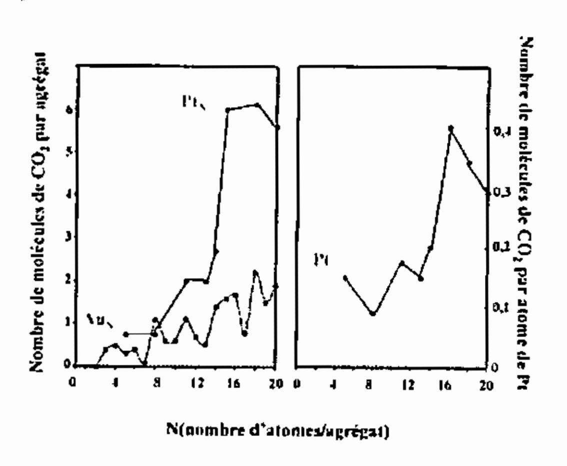
مقارنة شكل تكتلات البلاتين والبالاديوم

المتكونين من عدد محدد من الذرات.

ونتيجة البعدية الضعيفة للتكتلات وللعدد الكبير لذرات السطح بالنسبة لذرات الحجم، تتغير الخصائص الإلكترونية حتمًا بالنسبة لتلك الخاصة بالحالة المتكتلــة. وفى حالة البلاتين، تنخفض طاقة التأين (الطاقة اللازمة لانتــزاع إلكتــرون مــن هوية) عندما يتزايد حجم التكتل. وتظل الطاقة متكونة من عدد قليل مــن الــذرات عندما تصل إلى وضع التأين للبلاتين فى الحالة المتكتلة.

وتتزايد الخصائص الحفزية لتكتل ما مع حجمه. ومع ذلــك هنــاك حــدود. لنأخذ مثالاً، تحفيز أول أكسيد الكربون، CO، فى الغاز الكربــونى CO_2. تتزايــد

كمية CO_2 مع عدد الذرات المكونة للحفاز (أى مع حجمه) (الشكل ٢ أ). ومع ذلك إذا أوردنا النسبة المئوية لجزيئات CO_2، الناتجة لكل ذرة مكونة للحفـاز، يمكـن ملاحظة انقطاعات فى المردود (الشكل ٢ ب). والنشاط يكون فى أقـصى درجـة بالنسبة لـ ٥ و ١١ و ١٦ ذرة وفى حده الأدنى بالنسبة لـ ٨ و١٣، ثـم يـنخفض عندما يكون عدد الذرات أعلى عند ١٦. وتوضح أغلب الدراسات التـى أجريـت على الحفازات المختلفة أن النشاط الحفزى يتزايد مـع حجـم التكـتلات، ولكـن الانقطاعات غير المتوقعة تكون ملحوظة. وبعكس الخـصائص الإلكترونيـة مـن



الشكل (٢)

تغير مقارن بعائد إنتاج CO_2

الذى تم تحفيزه ببلاتين أو ذهب بالنسبة إلى عدد الذرات

المكونة للتكتل (أ). ونفس التغير المنسوب إلى عدد الذرات (ب).

المستحيل إذن استنتاج قانون عام للتغير الحفزى للتكتلات بالنسبة لعدد الذرات.

يكون لحافزين لهما طبيعة مختلفة (مثل البلاتين والذهب) ويتكونان من نفس عدد الذرات نشاطين مختلفين إلى حد بعيد. كذلك فإن تأكسد CO المحفّز بواسـطة $(Pt)_N$ يكون أعلى بكثير من ذلك الذى يتم الحصول عليه بـ $(Au)_N$. والمتشابهات

المختلفة التى يتم ملاحظتها مع البلاتين والبالاديوم تعود إلى تغير تشكلى يحث على تغيرات لخصائص إلكترونية للتراكم.

والخلاصة أن الخصائص الإلكترونية للتكتلات تعتمد على عدد ذرات المكونات. ومن الملاحظ أنه يوجد القليل جدا من التطبيقات الصناعية. والدراسات التى تجرى فى مجال التكتلات من ١ إلى ١٠٠ ذرة وتهدف بشكل أساسى إلى فهم سلوك المادة التى تتضمن ما بين ١ نانومتر و١٠٠ نانومتر (بين ١٠٠ ذرة وأكثر من ١٠٠٠٠٠) تقدم عددًا كبيرًا من التطبيقات المحتملة.

هوية البعد المتراوح بين ١ و١٠٠ نانومتر

يستعين تجهيز مثل تلك الهويات فى الوقت الراهن بالكيمياء.[٨٧] ويقوم المبدأ على خليط من مركبين معرضين لتفاعل بينهما لإنتاج إما هوية غير قابلة للذوبان (مساعد فصل مادة عن محلول وتكون مادة صلبة coprecipitation) وإما اختزال كيميائى (انتقال نوع أيونى إلى حالة معدن). وفى هذه الحالة لن تكون الهويات إذن أكثر تميزًا بعدد ثابت من الذرات. إن لها حجمًا متوسطًا معطى. وبهدف تثبيت المستوى، يمكننا أن نستعيد تكتلاً واحدًا من البلاتين متشكلاً من ١٠٠ ذرة يناظر نصف قطر ١,٥ نانو متر. عندئذ نقول إن الهوية نانومترية. والتشكل، نسبة السطح على الحجم والبعد الضئيل يظلان العاملين الراجحين للمواد النانو nanomateriaux بحجم أقل أو مساو لـ ١٠ نانومتر. وفى ما بعد هذا الحجم، تكون البنية البللورية وكذلك الخصائص البصرية والمغناطيسية مشابهة لتلك الخاصة بالمتكتل massif. وفيما يتعلق بالخصائص الحفزية، تظل مختلفة عن تلك الخاصة بالمتكتل. ويعود ذلك بشكل أساسى فى الواقع إلى أن العمليات الحفزية تتضمن استهلاك المتفاعلات فى الهوية.

---

(٨٧) Pileni (M. P.). Phys. Chem.. 97m 6961. (1993).

نقدم فى البداية الخصائص البصرية ثم المغناطيسية وفى النهايـــة الحفزيـــة للمواد النانو.

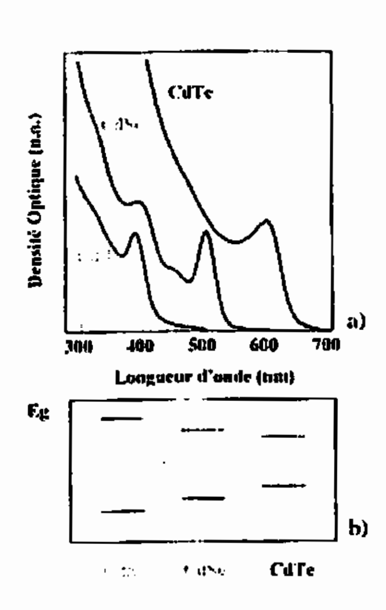
يتم الحصول على التغيرات الرئيسية للخصائص البصرية بالنسبة لحجمهـــا بواسطة أشباه موصلات[٨٨] ومعادن.[٨٩] وهى تعود بشكل رئيسى إلــى التغيــرات الإلكترونية للمواد. لننظر إلى أشـــباه الموصــــلات CdS وCdSe وCdTe بـــنفس الحجم المتوسط ٢ نانومتر. يعتمد طيفها المتصل بالامتصاص على نوع من المادة. ويوضح الشكل ٣ أنه من الممكن "كنس"، فى حالة الامتصاص، كل نطاق الأشـــعة فوق البنفسجية UV المرئية. وعند الأطوال الضخمة للموجة، يمكن ملاحظة تزايد حاد للامتصاص يتبعه عمود محدد جدا. ونحو الأطوال الضئيلة للموجـــة، يكـــون تزايد الامتصاص رتيبًا. وبالإضافة إلى ذلك، بالنسبة لمادة نانو معطاة، ينتقل طيف الامتصاص نحو الأطوال الضخمة للموجة عندما يتزايد حجم البللورات النـــانو[٩٠] (الشكل ٤). ويُقال إن هذه هى الظاهرة الكمية للحجم. وهكذا، فى حالـــة التغيـــر، سيان حجم مادة نانو، أو نوع المادة، من الممكن الحـــصول علـــى مـــواد بـــألوان مختلفة. ولا يصدر تغير اللون على الدوام من عديم لون أو أسود. ويتيح ذلك عددًا كبيرًا من التطبيقات، منها، على سبيل المثال، خلط مادة نـــانو فـــى مستحـــضرات التجميل مما يسمح بإنتاج منتجات تجميلية جديدة. وللمواد النانو حجم مخفض بمـــا فيه الكفاية حتى يكون السائل الذى تنتشر فيه هذه المواد موحد الخواص isotrope (شفاف بالنسبة للضوء). ويضاف إلى ذلك أنها تقدم امتصاصًا يختفى بشدة. وتتـــيح هذه الخاصية أيضا صنع مرشحات ضوئية. وإذا تأملنا فلـــورة fluoresence هـــذه المواد النانو، نلاحظ أنها تنتقل، مثل الامتصاص، نحو الأطوال الأضـــخم للموجـــة عندما يتزايد الحجم (الشكل ٤). ومن الملاحظ أن شريط الانبعـــاث ضـــيق جـــدا.

---

(٨٨) Lisiccki (I.) et Pileni (M. P.- . J. Amer. Chem.Soc>. 115. 3887. (1993). J. phys. Chem., 99, 5077(1995).

(٨٩) Petit (C.). Lixon (P.) et Pileni (M. P.). J. Phs. Chem.. 97.12974 (1993).

(٩٠) Ingert (D.). Feltin (N). Levv (I.). Gouzerh (P.). et Piloni (M. P.). Adv. Materials. 11, 220. (1999).



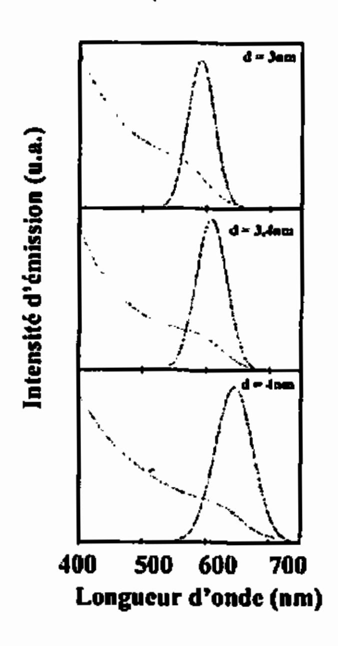
الشكل (٣)

أ) طيف الامتصاص لمادة نانو ٢ نانومتر لشبه موصل
من النوع II - VI (CdS وCdSe وCdTe).

ب) تغير طول الشريط الداخلى لا يحدث بالنسبة للمواد النانو
بنفس الحجم المتوسط يختلف باختلاف طبيعتها الخاصة.

وهكذا أيًا كان طول إثارة المواد النانو لـ CdTe فإن طيف الانبعاث يظل غير متغير بالنسبة للطاقة. وتمتد هذه الخاصية إلى مجموعة كبيرة من أشباه الموصلات. وكذلك يمكن ملاحظة ألوان فلورة مختلفة عند تغيير حجم مادة نانو. وتفتح تلك الخاصية الطريق أمام تطبيقات عدة. وأحد الأمثلة هو الراسمات traceurs فى البيولوجيا. وتتيح المواد النانو الإثارة exitation فى مجال طيفى واسع ولكن انبعاث الفلورة يكون واضحًا جدا. كذلك فإنه من الممكن تثبيت مولد مضاد antigene فى المادة النانو. وسوف يثبت انتقائيًا فى جسمه المضاد anticorps وتتيح فلورة المادة النانو حينئذ الكشف بطريقة دقيقة عن تموضح الجسم المضاد.

وفى حالة المعادن تكون الإلكترونات بالأحرى حبيسة كلما كان حجم المـــادة النانو صغيرًا. وذلك يحمل على تغيير الاستجابة البصرية والانتهاء إلى تغير فـــى طيف الامتصاص،[٩١] والمواد النانو من النحاس، المتناثرة فى المحلول، تقدم طيف امتصاص رتيبًا بالنسبة للمواد ذات الأحجام الصغيرة. وزيادة حجم المـــواد النـــانو



الشكل (٤)

طيف امتصاص لانبعاث فلورة

لمادة نانو من CdTe مختلف بحجمها.

يؤدى إلى ظهور عمود امتصاص يعرب بالأحرى عن أن حجم المواد النانو كبيـــر (نحو ١٠ نانومتر) لتحصل على خصائص بصرية للنحاس المتكتل. يتم الحـــصول على نتائج مشابهة بالفضة أو الذهب. ومرة أخرى نقول إن المواد النانو المعدنيـــة

---

(٩١) Lisiccki (I.) et Pileni (M. P.-, J. Amer. Chem.Soc., 115, 3887. (1993), J. phys. Chem, 99, 5077 (1995).

Petit (C.), Lixon (P.) et Pileni (M. P.). J. Phs. Chem., 97.12974 (1993).
Taleb (A.), Petit (C.) et Pileni (M. P.), Chemistry Materials, 9, 950 (1997).

يمكن استخدامها ليس فقط كمرشحات ولكن أيضا فى مجال مستحضرات التجميل. وتتيح الخاصية شبه الموصلة أو المعدنية لهذه المواد النانو أن نأمل فى خصائص إلكترونية يمكن استخدامها فى الإلكترونيات المجهرية micro - electronique.

ننتقل الآن إلى المواد النانو المغناطيسية. تقدم كل ذرة متكونة من بلورة نانو عزمًا مغناطيسيًا. وفى التقريب الأول، فإن العزم المغناطيسى لجزئ هو مجموع العزوم المغناطيسية لمجموعة الذرات التى تحتوى عليها. وهكذا فإنه يمكن تمثيل بلورة النانو بعزم مغناطيسى "عيانى macro". وتكون الطاقة المغناطيسية بنفس مقدار الطاقة الحرارية. وتحت تأثير مجال مغناطيسى يتوجه العزم العيانى. وفور انقطاع المجال المستعمل، تفقد المواد النانو توجهها. ويُعبر عن ذلك بمنحنى تمغنط لا يمثل تخلف المغناطيسية بعد زوال أسبابها hysteresis. وعرّف نيل[٩٢] Neel هذه العملية على أنها سلوك متوازى المغناطيسية فائق superparamagnetique، لا يسمح باستخدام المواد النانو للقراءة المغناطيسية.

وفيما يتعلق بالخصائص الحفزية، فينظمها عدد دورات (التحوّل turnover) التى تعتبر فى الواقع نسبة سرعة التفاعل لعنصر السطح. ونشاط وانتقائية أى حفاز تعتمد ليس فقط على طبيعة هذا الأخير، ولكن أيضا على الطاقات المستخدمة عند استجذاب adsorption المتفاعلات وعلى المنتجات. ومن ثم فإنه من المستحيل التنبؤ بسلوك حفاز بالنسبة لحجمه.

والخلاصة أن تغير البعدية dimensionalite ينتج عن تغيرات بصرية مهمة تتيح ليس فقط بحث عمليات أساسية مستخدمة، ولكن أيضا العديد من التطبيقات.

وبالعكس فإن السلوك المغناطيسى على هذا المستوى لا يتيح التطلع إلى تطبيقات. وفيما يتعلق بالخصائص الحفزية، فإنها تعتمد على نوع من الحفازات مستخدم وأيضا على طاقة استجذاب للمتفاعلات.

---

(٩٢) Neel (L.) Ann, Geophys, 5, 99, (1949), C. R. Acad. Science, Paris, 252, 4075, (1961), 253, 9, (1961), 353, 303, (1961), 253, 1286, (1961).

وفيما وراء ١٠ نانومتر، تقدم هذه المواد النانو خصائص سواء بـــصرية أو مغناطيسية تتشابه مع مثيلاتها لنفس العناصر فى حالة التكتل. ويلخص الـــشكل ٥ العوامل المختلفة المستخدمة عندما تُعتبر العناصر مفردة. وسوف نبحـــث تركيـــب هذه المواد النانو على مستوى بضعة ملليمترات بطريقة البحـــث عـــن خـــصائص جماعية تعود إلى هذا التركيب.

	0,1 – 1	1 – 10	10 – 100	100 d(nm)
Dénomination	Agrégat	Nanomatériau	Matériau mésoscopique	Massif
Structure	Forme dépend du nombre d'atomes	Massif		
Fabrication	Evaporation	Coprécipitation Réduction Chimique		
Physique	Propriétés électroniques spécifiques Diamètre / Forme		Massif	
Catalyse	Effet électronique sur la réactivité	Effet électronique + cinétique	Effet cinétique	
	Reconstruction de la surface			

الشكل (٥)

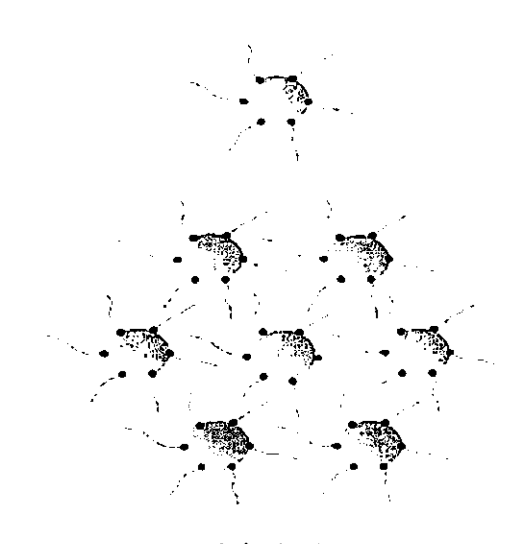
ملخص العوامل الفيزيائية المختلفة المسئولة

عن تغيرات الخصائص بالنسبة لحجم المادة.

تركيب مادة نانو

لتركيب مادة نانو يجب أولاً "كـــساؤها" بـــسلاسل طويلـــة هيدروكربونيـــة hydrocarbonees (نحيطها "بشعر")، الشكل ٦. وبسبب وجـــود هـــذه الـــسلاسل الهيدروكربونية يمكن لهذه المادة أن تنتشر فى مذيب غير قطبى (مثـــل الزيـــت). ومع تركيز ضعيف للجزيئات، يمكن اعتبارها مفردة. وفى هذه الـــشروط ســـتكون

الخصائص الفيزيائية (البصرية والمغناطيسية... إلخ) هى تلك الخاصة بالمادة النانو نفسها. فإذا وضعنا قطرة من هذا المحلول للجزيئات على ركيزة support، فإن المذيب يتبخر ويكون للسلاسل ميل إلى التداخل والتنظيم الذاتى فى شبكة سداسية مدمجة (الشكل ٦)، مثل البرتقال في سوق. وينتج هذا التنظيم الذاتى auto organisation - على مسافات بعيدة (عدة ميكرومترات).[٩٣] عندئذ يُطرح سؤال: هل هذه الخصائص البصرية لهذا التركيب متطابقة مع تلك الخاصة بالمواد



الشكل (٦)

رسم لمادة نانو "مكسوة" بشعر

يرتبط ثانية عند تبخر المذيب.

النانو المفردة؟ بالنسبة للهكسين hexane، يكون طيف الامتصاص للمواد النانو للفضة متميزاً بشريط رنين متمركز عند ٢,٩ إلكترون فولت eV. وعندما تكون البلورات ذاتية التنظيم فإن كلاً منها تكون معرضة لتأثير جيرانها. ويظهر

(٩٣) Motte (L.), Billondet (F.) et Pileni (M. P.), J. Phys. Chem., 99, 16425, (1995).
Motte (L.), Billondet (F.) et Pileni (M. P.) Advanced Materials, 8, 1018, (1996).

امتصاص جديد عند طاقة عالية.[٩٤] وفى هذه الحالة يختلف طيف الامتصاص للمواد النانو ذاتية التنظيم إلى حد كبير عن ذلك الخاص بنفس هذه الجزيئات مفردة. ويعود ذلك إلى تفاعلات ثنائية القطب ناتجة عن إشعاع.[٩٥] وهذا الامتصاص الجديد عند طاقة مرتفعة لا يمكن ملاحظته إلا إذا كانت المواد النانو منظمة فى شبكة سداسية مدمجة. كذلك فإن نمط التنظيم للمواد النانو للفضة يلعب دورًا أساسيًا بالنسبة للخصائص البصرية للتركيب. ومن وجهة نظر عملية، يمكن للجزيئات المفردة أن تلعب دور مرشح فى مجموعة طاقة تتراوح بين ٢,٥ إلكترونفولت و٣ إلكترونفولت فى حين أنه فى المنتظمة ذاتيًا فى شبكة سداسية مدمجة يمتد المرشح من ٢,٥ إلكترونفولت إلى ٥ إلكترونفولت. فإذا تزايدت الآن كمية الجزيئات (أو البرتقال)، فإنها تمتلئ طبقة طبقة. وعندما يصل عدد الطبقات الممتلئة إلى قيمة ٤ من الممكن ملاحظة تماثل ٤ – ٤ (النانومترية تكون على قمة مربعات متلاصقة ببعضها البعض) (الشكل ٧ أ). نلاحظ بنية مكعبة ذات شكل متمركز (الشكل ٧ ب) ونلقى نظرة على بنية مرئية فى أعلى البللورة. يمكن أن نرى ليس فقط ذرات فى السطح المستوى، ولكن أيضا تلك الموجودة خارج السطح المستوى. وتمثل هذه المجموع مربعًا (الشكل ٧ ب). وهذا التنظيم على هيئة مربع يكون من ثم بصمة طور بللورى لنوع مكعب على هيئة متمركزة.[٩٦] ويكون التركيب الآن "بلورة" مشابهة لتلك الخاصة بملح الطعام (أو كلوريد الصوديوم) حيث استبدلت ذرات الصوديوم والكلور بالمواد النانو.

وبالتقنيات المذكورة فيما تقدم من الممكن الحصول على إما مواد نانو مفردة أو منتظمة تبعًا لشبكة سداسية مدمجة (فى بعدين) أو تبعًا لبنية مكعبة على هيئة متمركزة (فى ثلاثة أبعاد). وبمساعدة طرف ذى مجهرية له مجال قريب من

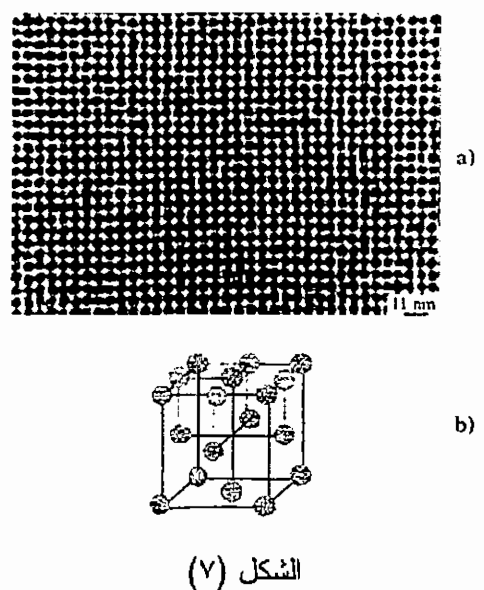
---

(٩٤) Taleb (A.), Petit (C.) et Pileni (M. P.), J. Phys. Chem., 102, 2214, (1998).

(٩٥) Taleb (A.), Russier (V.), Courty (A.) et Pileni (M. P.), Phys. Rev. B 59, 13350 (1999).

(٩٦) Russier (V.), Petit (C.), Legrand (J.) et Pileni (M. P.), Phys. Rev. B62, 3910 (2000). Motte (L.), Billoudet (F.), Douin (J.), Lacaze (E.) et Pileni (M. P.), J. Phys. Chem. 101, 138, (1997).

الممكن قياس التيار الذى يمر عبر المواد النانو (بين الطرف والركيزة). وعنــدما تكون منفردة على ركيزة لا يكون هناك انتقال لتيار (ويقــال إن هنـــاك توقفًــا)، وعندما تكون نفس الجزيئات منتظمة فى بعدين، فإن جزءًا ضعيفًا فقط من التيــار يمر، بينما فى الأبعاد الثلاثة يمر التيار. ويُوجد انتظام الجزيئــات النـــانو قاطعًــا بمقياس النانو مع مرور أو عدم مرور التيار.(٩٧)



الشكل (٧)

طبقات متعددة لبلورة نانو من الفضة فى شبكة ٤ x ٤ (أ)

وشبكة مكعبة على هيئة متمركزة (ب)

وتقدم هذه الخاصية تطبيقات محتملة مهمة. وهذا هو المثــل الأول القابــل لتوضيح أن المواد النانو، تبعًــا لتنظيمهـــا، يمكــن اســتخدامها كمفــاتيح قطـــع interrupteur. ولإنجاز ذلك سيكون من الضرورى أن نكون قادرين على تنظـــيم وإلغاء تنظيم المنظومة على مستوى من الزمن بالغ القصر.

(٩٧) Taleb (a.), Silly (F.), Gusev (A. O.), Charra (F.) et Pileni (M. P.), Advanced Materials 12, 633, (2000).

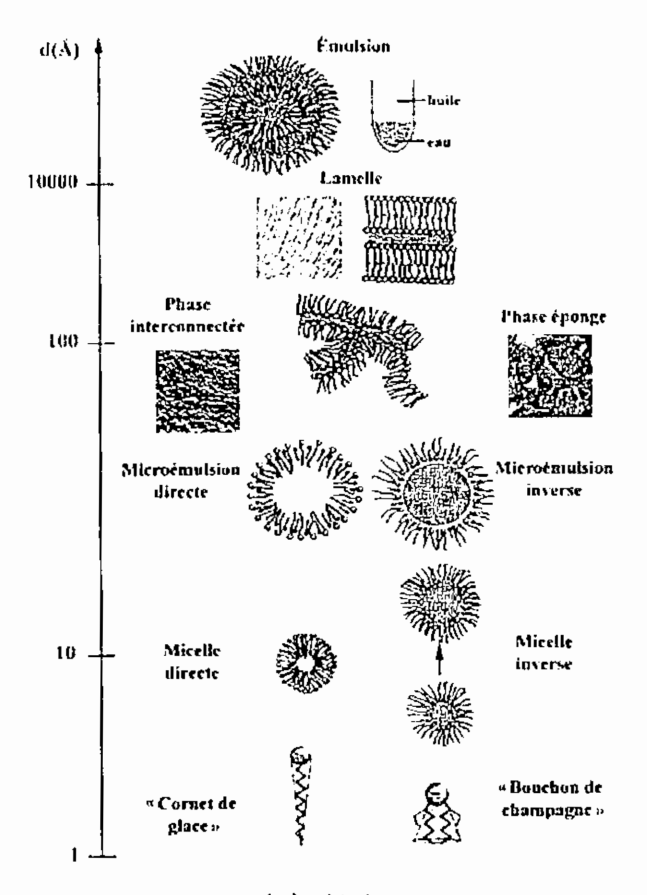
هناك عمليات تركيب ممكنة أخرى.[٩٨] وفى هذا العرض لن نستبقى سوى التركيب لمتفاعلات توترية tensioactifs. إنها الجزيئات المتكونة من رأس قطبى ماص للماء hydrophile (منجذب بالزيت). إنه فى الواقع نوع من الصابون. وإذا جربنا استذواب متفاعل توترى فى ماء، تميل السلاسل إلى أن تترابط مع بعضها البعض لتكوين خلائط مختلفة.[٩٩] ويلعب شكل المتفاعل التوترى دورًا مهمًّا فى تكوين التركيب.

إذا كان للمتفاعلات التوترية رأس قطبى كبير جدا وسلسلة صغيرة، يكون للمتفاعل التوترى حينئذ شكل مخروط (أو قرن الآيس كريم)، وتميل السلاسل لأن تترابط مع بعضها البعض لتكوين خلائط كروية يُطلق عليها خردلة قويمة micelle (الشكل ٨). وتتكون هذه الخردلة بشكل عام من بعض المتفاعلات التوترية. وعندما تكون هذه الخردلة متكونة من تركيز شديد الانخفاض، تكون كروية ويكون بعدها، المثبت بطول السلسلة الهيدروكربونية وبحجم الرأس القطبى، ذا قيمة ١٠٠ أنجستروم. ويتزايد حجم الخردلة القويمة بإضافة زيت، ذلك لزيادة حجم الخليط. وللمحافظة على استقرار التكوين، تكون زيادة المساهمة القطبية للتداخل ضرورية. ويتم التوصل إلى ذلك بإضافة كحول قابل للذوبان إلى حد ما فى الماء والزيت. ومن ثم فإن النسبة النسبية للكحول والزيت المضاف مهمة جدا. حينئذ يحمل الخليط اسم مستحلب مجهرى (الشكل ٨).

---

(٩٨) Stupp (S. I.), Son (S.), et Li (L. S.)., Science, 252, (1993), 59. De la matiere au vivant: Les systemes moleculaires organises, ed. CNRS (1994).

(٩٩) De la matiere au vivant: Les systemes moleculaires organises, ed. CNRS (1994).



الشكل (٨)

تطور حجم الخلائط المصنوعة انطلاقًا من متفاعلات توترية.

إذا كانت المتفاعلات التوترية على شكل سدادات شمبانيا (رأس قطبي صغير وسلاسل هيدروكربونية متفرعة) (الشكل ٨)، ترتبط بها الرؤوس القطبية، حينئذ يكون لدينا علاقة بخردلة معكوسة (الشكل ٨)، وهي خليط كروي. وبعكس الخردلة القويمة فإن بعدها يكون متغيرًا. وتعتمد على كمية الماء المضاف إلى المنظومة وتتنوع من ٤٠ إلى ١٨٠ أنجستروم. وكما هو الحال بالنسبة للخردل القويم، من الممكن إضافة الكحول لصناعة مستحلبات مجهرية بحجم يتراوح بين ٥٠ و ٣٠٠ أنجستروم.

إذا أضفنا الكثير من الماء إلى هذا المحلــول للخــردل المعكــوس، تتغيــر المنظومة كذلك تبعًا لبعديتها. وتتكون من تركيب يتشابه مع إسفنجة أو قنوات مــاء مشتركة الترابط.[١٠٠] وفي هذه الحالة الأخيرة ينقسم المكان إلــى قــسمين تحــت حجميين متساويين ومتشابكين بانتظام إلى درجة أنه في كل النقاط، يكون للــسطح شكل السرج. ويقال إنها تشكل أسطوانات ذات ترابط مــشترك. تلــك هــي بنــى المتصل الثنائي bicontinues فمرة ماء ومرة زيت. وينتج عن إضافة تكميلية من الماء تحول جديد في الطور. تصبح المنظومة غير شفافة وذات انكسار مــضاعف birefringent (يكون الضوء متحللاً بين قطبين متصالبين). ويشكل حينئــذ طــول صفيحة رقيقة. وتنتظم جزيئات المتفاعلات التوترية على هيئة طبقة رقيقة مسطحة (الشكل٨).

وينتج عن الإضافة التكميلية للماء فصل أطوار خليط demixion. لــم يعــد هناك ما يكفي من المتفاعلات التوترية لتغطيــة التــداخل مــاء - زيــت. وبعــد الخضخضة يكون المحلول معكرًا. هذا هو المستحلب (الشكل ٨). ويتكون ويختفي بمجرد توقف الخضخضة. وتظهر المنظومة الانتقالية وفصل طور ماء - زيــت. وحجم المستحلب يكون بمقدار ميكرومتري. وبالنسبة لمستحلب ميكرومتري يكــون سطح التلامس بين الماء والزيت ١ م^2. تلك ظاهرة تنتج عند خلط زيــت وخــل. بمجرد توقف الخضخضة lecithine ينفصل الخل والزيت. ومع ذلــك إذا أضــفنا صفار بيض (يحتوي على ليستين الذي يعتبر متفاعلاً توتريًا) وخــردلاً moutarde (الذي يعتبر متفاعلاً توتريًا أيضا)، يظل المستحلب المتكون مستقرًا خــلال عــدة ساعات. ومع ذلك إذا وضعنا هذا المستحلب في مبرد، تظهر عدة أطوار. وحتــى إذا كان معرضًا لدرجة الحرارة العادية، لن نحصل بعد على مستحلب أولي. ويقال إن المنظومة غير مستقرة.

---

(١٠٠) Cliches de cryofractures fournis par Dr T. Gulik du Centre de Genetique Moleculaire a Gif - sur - Yvette.

كذلك فإن الخردلة القويمة لها حجم ثابت بواسطة السلسلة والرأس القطبي للمتفاعل التوترى. وتشهد الخردلة المعكوسة (قطرات ماء فى زيت) زيادة في حجمها بين ٢ و١٨ نانومتر. وكلا النوعين من الخليط كرويان. وبزيادة كميات الماء من الممكن الانتقال نحو أطوار إسفنج أو أسطوانات ذات ترابط مشترك interconnectees أو أيضا نحو مستحلبات. وتبعًا للشروط التجريبية، يتيح ترابط المتفاعل التوترى تطورًا للمنظومة فى نطاق بعدية تتغير من ١٠ أنجستروم إلى أكثر من ١٠٠٠٠ أنجستروم (الشكل ٨).

وتم حديثًا توضيح أنه يمكن لمنظومة متفاعل توترى - زيت - ماء أن تكون مستحلبًا مستقرًا.[١٠١] وهذا فى الواقع خليط فائق supra agregat. ويحتوى على أسطوانات ذات ترابط مشترك في طوره الداخلى والخارجي. وفي الواقع طور صفيحة رقيقة (تنتظم المتفاعلات التوترية على هيئة صفائح رقيقة) لم يعد مسطحًا لكنه يشكل بصل (أو كريّة). وفى داخله نجد طور أسطوانات ماء ذات ترابط مشترك. وكذلك يحتوى طور البصل أنواعًا أخرى من الخلائط (أسطوانات ذات ترابط مشترك). وهذا الشكل مفضل جدا من وجهة نظر طاقية. ويزيد وجود أسطوانات ذات ترابط مشترك من كمية التداخل الضرورية لتجعل المستحلب مستقرًا وتكوُّن هذه المستحلبات يمكن تفسيره باعتبارات هندسية ترتبط بعلم تشكل morphologie المتفاعل التوترى.

هل يمكن لتركيب جزيئات عضوية أن يسمح بصنع مواد عضوية أو غير عضوية جديدة؟

وبمعنى آخر، هل يمكن اعتبار تركيب جزيئات عضوية كمفاعل نانو nanoreacteur أو أيضا " مصنع نانو nano - usine؟

---

(١٠١) Andre (P.), Filankembo (A.), Lisiecki (I.), Petit (C.), Tanori (J.), Guluk - Krzywicki (T.), Ninham (B. W.) et Pileni (M. P.), Advanced Materials, 12, 119, (2000).

لننظر فى أمر خردلات معكوسة التى تعتبر قطرات ماء صغيرة فى زيت (الشكل ٨)، حيث يتغير الحجم باستمرار تبعًا لكمية الماء المضافة. وتنتقل هذه القطرات الصغيرة، المتناثرة فى الزيت، بطريقة احتمالية. ويقال إنها معرضة لحركة براونية Brownien. وعند التصادمات، تغير محتواها المائى لتكوين خردلتين متميزيتين.[١٠٢] وتتيح هاتان الخاصيتان (حجم وتغير المحتويات المائية) استخدامها كمفاعلات نانو بأحجام مختلفة.

إذا كان لدينا متفاعلين A أحدهما قابل للذوبان فى الماء والثانى فى الماء أو الزيت. عند تبادل النشاط، يتلامس A و B ويتفاعلان. وكذلك يمكن التأثير على تفاعلات ترسيب كيمائى أو اختزال كميائى أو أيضا البلمرات polymerisations. وتم استخدام هذه العملية لصنع عدد كبير من المواد العضوية بالإضافة إلى غير العضوية.[١٠٣]

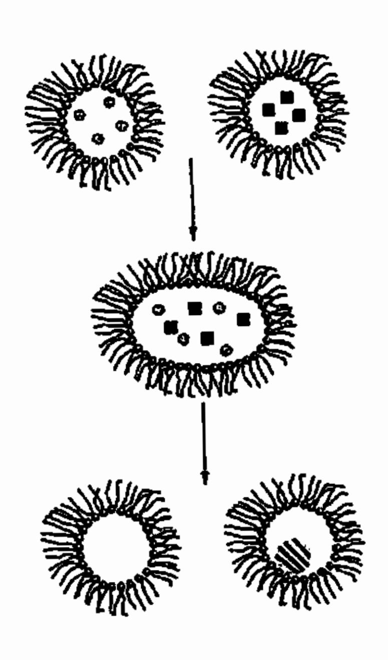
ولتوضيح استخدام هذه المفاعلات النانو سنصف فيما يلى أنواعًا مختلفة من التفاعلات:

– اختزال كيميائى: يتيح اختزال النحاس صناعة بلورات نانو من النحاس. ويتزايد حجم البلورات النانو مع حجم المفاعل النانو. ومن المثير ملاحظة أن مثل

---

(١٠٢) Reverse miccelles, Ed. Pileni (M. P.) Elsevier (1989).

(١٠٣) Pileni (M. P.), J. Phys. Chem., 97, 6961, (1993).
Pileni (M. P.), Langmuir, 13, 3266, (1997).
Hammouda (A.), Gulik (Th.) and Pileni (M. P.), Langmuir, 11, 3656, (1995).



الشكل (٩)

عملية تبادل خردلات معكوسة.

هذا المفاعل النانو يسمح بالحصول على مواد معدنية قابلة للأكسدة إلى حد بعيد بدون أن يكون وجود أكسيد قابلاً للكشف.

- تفاعل بين مادة غير عضوية وجزئ عضوى.
- تثبيت "شعر" (أو سلاسل طويلة راهبة للماء hydrophopes) على مواد نانو غير عضوية: بعد التخليق الاصطناعى لمادة نانو عى هيئة خرادل معكوسة، تتم إضافة مشتق كحول كبريتى thiol (R-SH) على المحلول الخردلى. عندئذ يكون هناك تفاعل بين الذرات بتدخل مادة نانو ومجموعة SH. إذا كانت المجموعة R ذات سلسلة طويلة هيدروكربونية، تكون البللورة النانو عندئذ محاطة بـ "شعر". ويكفى حينئذ توقيف الخردلات المعكوسة لاستعادة البللورات النانو " المكسوة" (شكل ٦) على هيئة مسحوق وتوزيعها فى مذيب غير قطبى (زيت).

- تغير كيميائى لإنزيمات[١٠٤]: أغلب البروتينات والإنزيمات تفقد خصائصها فـــى وجود الزيت. غير أنه من الممكن جعلها تتصل ببعضها إذا تم استخدام خردلات معكوسة. ويستذوب الجزئ العيانى macromolucule فـــى القطـــرات الـــصغيرة. حينئذ يلعب المتفاعل التوترى دور الحائل والواقى لكل تحويل للصفات الطبيعيـــة denaturation. ويتيح المفاعل النانو تغيير الجزئ العيانى كيميائيًا وجعلـــه راهبًـــا للماء من جديد بدون أن يسبب ذلك تحويل صفاته الطبيعية.

وعلى هذا المنوال يمكن للخردلات المعكوسة أن تصنع بلورات نانو غيـــر عضوية كروية. وهى قادرة أيضا على التغيير الكيميائى للجزيئات العيانية. وهـــذه العملية الأخيرة ذات أهمية كبيرة للتكنولوجيا الحيوية. وقد يُطرح الآن سؤال آخر. هل يمكن للأنواع الأخرى من التركيب الموصوفة فى (الشكل ٨) أن تـــسلك مثـــل مفاعلات نانو؟

لا يختص هذا المدخل إلا بالمواد غيـــر العـــضوية. ومـــن الممكـــن فـــى المنظومات ذات الترابط المشترك الحصول على أســـطوانات معـــدن نحـــاس[١٠٥] (الشكل١٠). وإضافة كلوريد الصوديوم (NaCl) يفضل تكوين "عصى" طويلة من النحاس[١٠٦] طول كل منها ١ مايكرومتر وعرضها ٢٠ نانومتر.[١٠٧] وتتميز تلـــك العصى ببللورية عالية مع أسطح شبكية الشكل reticulaires محددة جيدًا.[١٠٨] وإذا استبدلنا كلوريد الصوديوم بنتـــرات الـــصوديوم (ملـــح جديـــد يـــسمى "مـــشاهد spectateur"، لا يلاحظ سوى الكرات.[١٠٩] وإضافة أملاح أخرى تـــستثير أيـــضا

---

(١٠٤) Michel (F.) et Pileni (M. P.), Langmuir, 10, 390, (1991).
Pitre (F.), Regnant (C.) et Pileni (M. P.), Langmuir, 9, 2855, (1993).

(١٠٥) Tanori (J.) et Pileni (M.-P.), Langmuir, 13, 639, (1997).

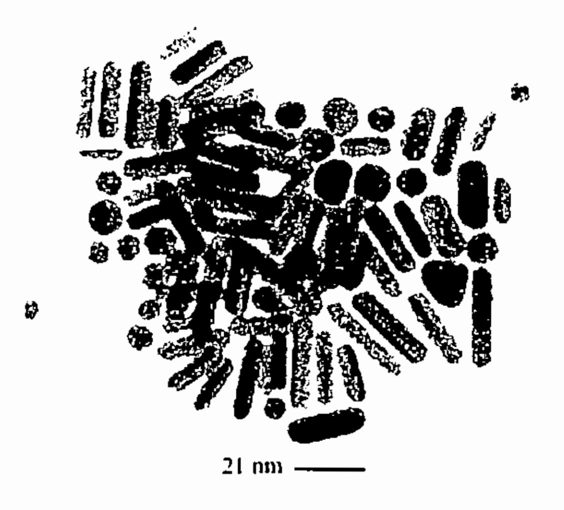
(١٠٦) Filankambo (A.) et Pileni (M.-P.), J. Phys. Chem., 104, 5867, (2000).

(١٠٧) Filankambo (A.) et Pileni (M.-P.), J. Phys. Chem., 104, 5867, (2000).
Lisiecki (I.), Filankembo (A.), Sack-Kongehl (H.), Weiss (K.), Pileni (M.-P.) et Urban (J.), Phys. Rev, B 87, 1, (2000).

(١٠٨) Tanori (J.) et Pileni (M.-P.), Advanced of Materials, 7, 862, (1995).

(١٠٩) Lisiecki (I.), Filankembo (A.), Sack-Kongehl (H.), Weiss (K.), Pileni (M.-P.) et Urban (I.), Phys. Rev, B 87, 1, (2000).

تغيرات مهمة جدا فى بنية المادة، بينما لا يتغير شكلها. ويعود ذلك إلى تغيرات فى بنية الماء داخل الطور المجهرى. microphase.



الشكل (١٠)
أسطوانات نحاس تم الحصول عليها
فى طور أسطوانات ذات ترابط مشترك

الخلاصة

يلعب المستوى فى البعد دورًا مهمًّا بالنسبة لسلوك المادة. وبالنسبة للخلائط المركبة من عدد ذرات أقل من ١٠٠، فإن التغير التشكلى تصاحبه تغيرات فى الخصائص الإلكترونية والعكس بالعكس. ويرتبط النشاط الحفزى أيضا بشكل مباشر بالخصائص الإلكترونية للخليط. وفى هذه الحالة الأخيرة يجب أن نأخذ فى اعتبارنا أيضا طاقة استجذاب المتفاعلات والمنتجات للخليط. ولولا أن عددًا كبيرًا من الدراسات قد تم الإقدام عليه، لما كان هناك قانون عام قابل للتنبؤ بشكل الخليط وتغيرات خصائصه الإلكترونية والحفزية. ويوضح ذلك تنوع المادة والصعوبة لدى علماء الكيمياء وعلماء الفيزياء فى فهم سلوكها. وعندما يتزايد عدد ذرات

خليط يمكن رصد قوانين عامة، مثل التأثير الكمى لحجم أشباه الموصلات أو التغير البصرى للمواد ذات الحجم الأصغر من ١٠ نانومتر، ولا ننسى السلوك فائق المتوازى المغناطيسى super - paramagnetique للمواد النانو المغناطيسية. ومع ذلك من المستحيل أن نجد قوانين عامة فيما يتعلق بالتحفيز. وهذا يعود ليس فقط إلى تغيرات الخصائص الإلكترونية للمادة، ولكن أيضا إلى السيرورات الحركية الناتجة عن إعادة إنشاء السطح. وهذا على مستوى مرتبط مباشرة بخصائص الامتصاص الكيميائى chimisorption للمتفاعلات، ولكن أيضا بالمنتجات على سطح المادة النانو. وفيما وراء ١٠٠ نانومتر، تكون الخصائص الفيزيائية للمادة مشابهة لتلك الخاصة بالمتكتل massif. وفيما يتعلق بالخصائص الحفزية، تظل الظواهر الحركية مع إعادة إنشاء الأسطح هى فقط العمليات الغالبة. ويتيح ترابط المواد النانو على مسافة طويلة رصد خصائص فيزيائية مختلفة عن تلك الخاصة بالجزئ المنفرد وبالمادة المتكتلة. وقد يتعلق بقابلية للذوبان مختلفة مثلما يحدث فى حالة المفاعلات التوترية أو أيضا اختلافات الانعكاسيات reflexibilites. وتتأثر كل بلورة نانو بجيرانها. ولقد استطعنا أيضا الإشارة إلى وجود خصائص جماعية سيان بصرية أو مغناطيسية، ولكن أيضا نقل إلكترونى. وتُلاحظ أيضا عمليات ترابط ذاتى auto - association مع الجزيئات العضوية التى لها مجموعات مختلفة وظائفيًا. ويتيح ترابط هذه الجزيئات الحصول على خلائط يمكن لحجمها أن يتغير بمقادير متعددة. ولقد أوضحنا أيضا أن المنظومات الغروانية colloidaux تسمح بصنع بلورات نانو ذات أبعاد مختلفة. وتتيح أيضا التغيير الكيميائى للجزيئات العيانية. وهذا العرض، بالتأكيد، محدود جدا بالنسبة للكيمياء، لكنه يوضح أن نفس العنصر يمكن أن يوجد تحت أشكال مختلفة وأن خصائصه تختلف بشكل ضخم.

المراجع:

- HEIZ (U.), et SCHNEIDER (W.-D.), *Metal Clusters and Dots*, éd. Meiwes-Broer (K.-H.) Spring Verlag, 1999.
- TALEB (A.), PETIT (C.) et PILENI (M.-P.), *J. Phys. Chem.*, 102, 2214, (1998).
- TALEB (A.), RUSSIER (V.), COURTY (A.) et PILENI (M.-P.), *Phys. Rev.* B, 59, 13350, 1999.
- STUPP (S.-I.), SON (S.), LI (L.), LIN (H.C.) et KESER (M.), *J. Amer. Chem. Soc.*, 117, 5 252, 1995.

الإنتروبيا والمعلومات:
تصور متغير الشكل[١١٠]

بقلم: روجيه بالين
Roger BALIAN

ترجمة: عزت عامر

اشتقت كلمة إنتروبيا[١١١] entropie في ١٨٦٥ بواسطة عالم الفيزياء الألماني كلاوزيوس Clausius انطلاقًا من الجذر اللاتيني τροπή الذي يستدعي فكرة التحول أو العودة إلى الخلف. ولقد قدم هذا القياس، كما سيتضح لنا فيما بعد، بهدف التمييز الرياضي لعدم انعكاسية العملية الفيزيائية مثل تحول الشغل إلى حرارة. ومنذ ذلك العصر، مثلما كان يوصف به الإله الإغريقي بروتيس Protee(الذي يستطيع تغيير شكله بإرادته)،لم يتوقف تصور الإنتروبيا هذا عن التحول، والإفلات ممن يرغب في الإمساك به، ومثل بروتيس، فإنه يستند إلى الحدس. وتأكدت أهميته، وامتد مجال تطبيقه بالتدريج إلى الكيمياء والرياضيات والمعلوماتية والبيولوجيا والاقتصاد. وسوف نرى بشكل خاص أن تصور كمية المعلومات quantite d`information، المفيد في نظرية الاتصال أو المعلوماتية، ينتسب بدقة إلى هذه الإنتروبيا، وهو مثال بارز للتوحيد بين مجالات المعرفة التي طال ظهورها كثيرًا.

وفي الواقع كان من الضروري أن يمر أكثر من قرنين لتحقيق هذا التوحيد، نظرًا للطريق المعوج للعلم في هذا المجال الذي يهمنا هنا. كذلك فإن ما نطلق عليه

---

(١١٠)نص المحاضرة رقم ٢٣٩ التي ألقيت في إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٦ أغسطس ٢٠٠٠.

(١١١) الإنتروبيا: عامل رياضي يعتبر مقياسًا للطاقة غير المستفاد منها في نظام ديناميكي حراري، أو مقياس للفوضى والعشوائية في نظام مغلق، أو مقياس لفقدان المعلومات في رسالة تم بثها، أو ميل افتراضي لجميع أنواع المادة والطاقة في الكون نحو حالة من التوحد الهامد. (المترجم)

المبدأ "الأول" للديناميكا الحرارية، حفظ الطاقة، لم تتم معرفته إلا بعد نحو عشرين عامًا من الإعلان، فى ١٨٢٤، عن المبدأ "الثانى" بواسطة سادى كارنو Sadi Carnot. وحدث أيضا فى وقت أكثر تبكيرًا، فى ١٨١١، أن تمت صياغة قانون سريان الحرارة بواسطة جوزيف فورييه Joseph Fourier، بينما لم يتم تفسير الطبيعة الفيزيائية للحرارة إلا فى نهاية القرن التاسع عشر. وأوحى مفهوم الإنتروبيا بمفهوم كمية المعلومات، منذ أكثر من قرن، ورغم ذلك يبدو مفهوم كمية المعلومات اليوم هو الأساسى أكثر، وهذا ما سنبدأ به.

كمية المعلومات ونقص المعلومات

تستهدف نظرية الاتصال نقل الرسائل عن بعد على أكمل ما يكون، والتى قد تُدوّن صوتيًا أو بصريًا. ولقد تأسست فى ١٩٤٨ بواسطة كلود شانون Claude Shannon وفارين فيفر Warren Weaver، عالما رياضيات أمريكيان عملا حينئذ على تحسين منظومات التهاتف. وكان يلزمهما لهذا الهدف مقارنة أداءات عمليات نقل مختلفة للمعلومات، وتحتاج هذه المقارنة إلى تشفير كمية المعلومات المحمولة بواسطة الرسائل المطلوب نقلها. وواجهت المعلوماتية فيما يبدو مشكلة عندما كان من المرغوب فيه تخزينها فى شريط مغناطيسى، قرص أو ذاكرة ذات وثائق عادية مختلفة، والتى تتعامل مع معطيات رقمية، ونصوص، وموسيقى، وصور حقيقية أو افتراضية. وينبغى حينئذ شغل أقل مكان ممكن فى الذاكرة، وهو ما لم يكن من الممكن التوصل إليه تلقائيًا إلا إذا كنا نعرف كيفية التقدير الرقمى لكمية معلومات متضمنة فى هذه الوثائق.

ولُوحظ فى البداية أن الرسالة المطلوب نقلها (أو الوثيقة المطلوب تخزينها) ليست ذات معنى فى ذاتها، إلا أنها مستخرجة من مجموعة من الرسائل، وهى القابلة بشكل مسبق للبث. وهكذا فإن اسم المنتصر فى مباراة ألعاب قوى يُستخرج من قائمة المتسابقين. وكل واحد منهم مُشار إليه بـ m، له احتمالية محددة P_m لأن

ينتصر. ومعرفة أن المصارع m هو الذى فاز، تقتضى كمية محددة من المعلومات I_m. وهذه الكمية التى يجب بالأحرى أن تكون أكبر من m كان لها احتمالية Pm أقل من أن تفوز: إذا كان m متنافسًا قليل الحظ، فإن فوزه غير المتوقع يتضمن أهمية جديدة، أما إذا كان m بالعكس المفضل أكثر، فلن يحمل لنا فوزه أى معلومات. ومن ثم فإن كمية المعلومات I_m المصاحبة لرسالة ما تكون دالة متناقصة fonction decroissante مع احتماليتها P_m. ويضاف إلى ذلك أن هذه الدالة يجب أن تكون تكميلية additive: إذا كانت رسالة مكونة من جزأين مستقلين إحصائيًا (كما هو الحال فى مبارتين)، فإن كمية المعلومات التى تحملها يجب أن تكون مجموع كميتى المعلومات المحمولتين بكل من جزئيها، بينما تكون احتماليتها هى ناتج احتماليتى هذين الجزئين. وينتج عن هذا أن كمية المعلومات المنقولة برسالة m ذات احتمالية P_m يجب أن تكون:

$$I_m = \log_2 \frac{1}{p_m} \qquad (1)$$

والاختيار ذو القاعدة ٢ للوغاريتم يحدد وحدة المعلومات، البت bit: إذا تقلصت الرسالة إلى إعلان نتيجة سحب رهان الوجه أو القفا، فإن احتماليتها يجب أن تكون $Pm = 1 / 2$، وتنقل بت معلومات.

نحن فى موضع قبل النقل (أو قبل الوضع فى الذاكرة). ولم يعرف المرسل إليه بعد أن مجموعة الرسائل m قابلة لاستقبالها. ويتم قياس عدم يقينه incertitude بقيمة I، أى حيرته، وهى قيمة متوسطة لكمية المعلومات التى سيكون عليه الحصول عليها بعد استقبال إحداها. وهذا "النقص فى المعلومات" I يتم الحصول عليه من ثم بموازنة المعلومات (١) المصاحبة لكل رسالة m بالاحتمال P_m لاستقبال هذه الرسالة. وفى الحالة الخاصة حيث للرسائل عدد كلى W، يكون لها جميعًا نفس الاحتمال $P_m + 1 / W$، ونحصل على

$$I = \Sigma_m P_m I_m = \log_2 W. \qquad (2)$$

وهذا المفهوم حول نقص المعلومات يُستخدم تطبيقيًا لجعل نقل الرسائل أو تخزين المستندات أقرب ما يكون إلى الكمال. ومن الضرورى فى الحالتين تشفير الرسالة أو المستند بالإشارات، الكهربائية مثلاً أو المغناطيسية، والتى سيتم بثها أو تخزينها فى الذاكرة. وأتاح استخدام الصيغة (2) لشانون وفيفر أن يبرهنا على خاصية بارزة: يوجد بالنسبة لكل مجموعة الرسائل نمط تشفير أمثل يتيح نقل الحد الأقصى من المعلومات فى خط اتصال ما، رغم عمليات الفقد الاحتمالية للإشارات، أو يجعل الفراغ المشغول بمستندات فى الذاكرة فى حده الأدنى. ويعطينا التليفزيون الرقمى مثالاً. يعتمد التشفير الأمثل على الرسائل المطلوب إرسالها: ليس الأمر هو نفسه بالنسبة للكلام (التليفون) أو بالنسبة للموسيقى (راديو)، وليس الأمر هو نفسه بالنسبة للنصوص المكتوبة (فاكس) أو للصور.

وأصبحت مفاهيم التخزين والاتصال والتشفير أساسية فى البيولوجيا منذ اكتشاف دور المعلومات الوراثية فى الآليات الجزيئية للكائنات الحية. وتتالى النكلوتيدات nucleotides التى تتتابع على طول سلاسل الدنا ADN يشكل رسالة، مخزنة فى الكروموزومات، ويتم تشفير هذه الرسالة بواسطة أبجدية من ٤ أحرف، النكلوتيدات الأربعة. ومن جانب آخر فإن البروتينات تؤكد على الوظائف الرئيسية الحاسمة بفضل بنيتها، وهى نفسها محكومة بتتالى أحماض أمينية يتكون منها كل بروتين. ويشكل هذا النوع من التتالى أيضا رسالة، تشفَّر هذه المرة بواسطة أبجدية من ٢٠ حرفًا، وهى الـ ٢٠ حمضًا أمينيًا. ونسخ transcription رسالة الدنا ADN هو الذى يسبب ترتيب الأحماض الأمينية عند تخليق البروتين فى الخلية.

الاحتمالات وعدم اليقين

تتيح الصيغة (2) الربط بين كل قانون احتمالى ورقم I. وفى هذا السياق (الشكل ١ العمود الثانى)، تكون الاحتمالات Pm متأثرة بالوقائع الاحتمالية أيًا كانت m، ويتيح العدد I مقياسًا طبيعيًا لـ"عرض" etalement قانون الاحتمال، أو

مقياسًا لعدم اليقين incertitude المصاحب. وبالنسبة لعدد معين من الوقائع، يكون I منعدمًا فى حالة مؤكدة، وعندما يكون أحد الاحتمالات Pm هو I، والآخر منعدم، يكون I فى الحد الأقصى، ويأخذ القيمة (2)، عندما يكون للوقائع نفس الاحتمالية. وتزداد هذه القيمة (2) مع W: عدم يقين واقعة متوقع يكون بالأحرى كبيرًا لا سيما فى وجود مزيد من الوقائع المحتلمة، مع احتمالات I/W متساوية.

وهكذا تجعل نظرية المعلومات مفهوم عدم اليقين كميًّا بربطه بوصف احتمالى، وبربط العدد I بخاصية غير مكتملة لمعرفتنا بالوقائع M القابلة للحدوث. وأدى وجود هذا المقياس لعدم اليقين إلى مولد معيار يسمى الإنتروبيا القصوى entropie maximale، تستخدم للتأثير على احتمالات الوقائع الاحتمالية، مثلاً تفسير صور ناقصة: من بين القوانين الممكنة المختلفة للاحتمالية، نختار تلك التى تجعل عدم اليقين I فى أقصاه بهدف تجنب التأكيدات غير المبررة.

	اتصالات	احتمالات	فيزياء إحصائية
m	رسالة	واقعة	شكل
Pm	مجموعة رسائل	قانون احتمالية	حالة ديناميكية حرارية
I, S	نقص معلومات	عدم يقين، عرض	إنتروبيا، فوضى

الشكل (١)

تطابق بين نظرية الاتصال والاحتمالات والفيزياء الإحصائية.

الإنتروبيا فى الديناميكا الحرارية

لنواصل بحثنا عن مفهوم الإنتروبيا، الذى ظهر للوهلة الأولى غريبًا عن ذلك الخاص بكمية المعلومات، مع أن كلا الاثنين قد يكونا نتيجتين لاعتبارات تكنولوجية. وكانت المعلومات قد قُدمت لتحسين عائد منظومات للاتصال. وكانت الديناميكا الحرارية التى تعتبر الإنتروبيا فيها أحد الأسس العظيمة قد ظهرت فى ١٨٢٤ من خلال "تأملات حول القوة المحركة للنار" لكارنو Canot، بربطها بعائد

الماكينات البخارية. ثم أصبحت بعد ذلك علمًا للتحولات القابلة للحدوث فى المادة على مستوى عيانى macroscopique، أى مستوانا. ويمكن أن ترتبط هذه التحولات بتغيرات فى الحرارة، فى ظواهر ميكانيكية وكهرومغناطيسية أو أيضا كيميائية. وبعضها قابل للانعكاس. مثال لذلك مقفزة، إذا تجاهلنا التباطؤ التدريجى لحركتها، تعود بشكل دورى إلى حالتها الأولية، وهى التغيرات المتعاقبة بين طاقة مرونة الزنبركات، الطاقة الحركية للنطاط (التى تتزايد مع سرعته الرأسية) وطاقته الجاذبة الكامنة (التى تتزايد مع ارتفاعه). وهناك محركات كهربائية يمكنها أن تعمل بمولد dynamo، والطاقات الميكانيكة والكهربائية تتحول هنا بطريقة غير قابلة للانعكاس من إحداها للأخرى. وهناك تحولات أخرى غير قابلة للانعكاس مثل تحول الطاقة الميكانيكية إلى حرارة فى كوابح السيارة، ومثل تدفق تلقائى لحرارة لا يمكن أن تسرى إلا فى اتجاه واحد، من الساخن نحو البارد، أو مثل الاشتعال.

وتقوم الديناميكا الحرارية على مبدأين مهمين. الأول يقوم على مفهوم الطاقة: فى كل التحولات لمنظومة معزولة، لا تتبادل أى شىء مع الخارج، تكون الطاقة محفوظة. والمبدأ الثانى يتعلق بعدم انعكاسية التحولات، وأدخل قيمة لا تكون محفوظة، هى الإنتروبيا. وتلك القيمة، المسماه S، هى وظيفة لمتغيرات تصف على المستوى العيانى حالة المنظومة المعطاة. وبالنسبة لمائع نقى متجانس، تكون هذه المتغيرات مثلاً الحجم، والكتلة ودرجة الحرارة، وبالنسبة لمنظومة تتكون من عدة أجزاء، فإنه يتم الحصول على S من إضافة إنتروبيا كل من هذه الأجزاء. ويعبر المبدأ الثانى عن أنه لا يمكن لأى تحول أن يجعل الإنتروبيا تتناقص فى منظومة معزولة.

ويؤكد هذا المبدأ وجود الإنتروبيا لكنه لا يعطى قيمتها كدالة للمتغيرات الأخرى العيانية. ويستخدم تعيينها التجريبى تحولات قابلة للانعكاس حيث يتم حفظ الإنتروبيا.

وكان قد تم استخدام مفهوم الإنتروبيا فى البداية للوصف الرياضى لعدم انعكاسية ظواهر حرارية. لننظر إلى عملية ما، حيث يوجد مصدر ساخن يتخلى عن الحرارة، بأن يتحول جزء منها إلى عمل والجزء الآخر منها يتدفق نحو مصدر بارد. يُضاف إلى حفظ الطاقة مبدأ عكسى يعبر عن زيادة الإنتروبيا الكلية: يجب أن تكسب الأجسام الباردة مزيدًا من الطاقة التى لم تفقدها الأجسام الساخنة. ويضع هذا التباين حدًا أعلى للعمل الذى يمكن بذله فى عملية ما، ومن ثم لعائد الآلات الحرارية. وكان قد تم فى النصف الثانى من القرن التاسع عشر معرفة أن زيادة الإنتروبيا S لمنظومة معزولة تقيس بشكل أكثر عمومية درجة عدم انعكاس العمليات. وهكذا فإن إنتروبيا فنجان قهوة باللبن أعلى عند جمع إنتروبيا القهوة واللبن منفصلين، والفرق هو إنتروبيا المزيج. وبنفس الطريقة، فى الكيمياء، فإن الاشتعال يزيد الإنتروبيا.

الإنتروبيا فى الفيزياء الإحصائية

ويتفق وجود وخواص الإنتروبيا المتمثلة فى المبدأ الثانى مع الممارسة التى ظلت غامضة إلى حد ما. ماذا تعنى هذه القيمة، التى تعتمد على متغيرات لحالة المادة، والتى تكون الزيادة فيها مصحوبة بعدم انعكاس، أى "سهم الزمن"؟ ولعل مفهوم المادة، المجرد، قد يصبح غير مفيد بسبب خاصيته فى الحفظ، لكن ذلك المفهوم الخاص بالإنتروبيا، والأكثر تجريدًا أيضا، تم إدراكه بصعوبة. ولم يتوقف هذا السؤال عن ملاحقة لودفيج بولتزمان Ludwig Boltzmann (١٨٤٤ – ١٩٠٦) الذى شارك فى توضيح طبيعة الإنتروبيا وتفسيرها للمتغيرات.

وتقوم أعماله على فكرة – قوة idea - force، من نوع "اختزالى": يجب البحث عن تفسير للخصائص العيانية للأشياء بالاستناد إلى بنيتها المجهرية. ونعرف الآن أنه على مستوى الأنجستروم (جزء من عشرة آلاف من الميكرون) تكون المادة المحيطة بنا متكونة من جزيئات، أو ذرات، أو أيونات. والقوانين،

الأكثر بساطة نسبيًا، التى تحكم هذه الجزيئات، هى نفسها بالنسبة لكل المواد، والتنويعة الهائلة للخصائص التى تتم ملاحظتها على مستوانا العيانى ناتجة عن التنظيمات المختلفة بين المكونات الأساسية. ويتضمن العدد الهائل لتلك الأخيرة استخدام مناهج دراسة إحصائية، فمثلاً، كرة هواء نصف قطرها ١ ميكرون تحتوى على ١٠٠ مليون جزئ. وتطور علم جديد، الفيزياء الإحصائية physique statistique (أو الميكانيكا الإحصائية) على هذه الأسس منذ منتصف القرن التاسع عشر مع نجاح كبير.

تمكنت الفيزياء الإحصائية فى البداية من وصف مفاهيم الديناميكا الحرارية، على مستوى مجهرى، وتفسير مبادئها العامة. وهكذا فإن ضغط غاز يتم تعيينه بقوة متوسطة صادرة عن الجزيئات بسبب حركتها وتصادماتها مع الجوانب الداخلية. ويتم وصف درجة الحرارة على أنها ظهور عيانى للاستثارة المضطربة لمكونات مجهرية، والحرارة على أنها طاقة حركية مصاحبة. وينتج المبدأ الأول حينئذ من حفظ المستوى المجهرى للطاقة الميكانيكية. ويتضمن الهدف الثانى للفيزياء الإحصائية من تقليص "قوانين تصرف" المواد المختلفة فى بنيتها المجهرية. كذلك بالنسبة للغازات، فإن معادلة الحالة التجريبية لماريوت – بويل Mariotte - Boyle، والمعادلات الديناميكية لنافيير – ستوكس Navier - Stokes، تترتب عليها قوانين بسيطة لحركة الجزيئات.

ويؤدى اجتياز مستوى إلى آخر إلى تغير كيفى أساسى فى مفاهيم الخصائص. الفيزياء المجهرية غير متصلة، واحتمالية، وخطية، وقابلة للانعكاس، بينما الفيزياء العيانية الناتجة عنها تكون متصلة، حتمية، غير خطية، لا انعكاسية. ذلك هو مفهوم الظهور البارز لتلك السلوكيات الجديدة التى جعلت الاختزالية redutionisme مثمرة.

كذلك من أجل فهم الأسس المجهرية للمبدأ الثانى ومعنى الإنتروبيا، نذكر أولاً حالة ديناميكية حرارية، ورغم وصفها بمعطيات بعض المتغيرات العيانية،

فهى على مستوى مجهرى غير معروفة جيدًا. ومثال لذلك، الـديناميكا الحراريـة لغاز تقوم على تعيين ثلاثة متغيرات، الحجم، والكتلة، ودرجة الحرارة، التى تكون على المستوى المجهرى الحتمى فقط هى الحجم المتاح بالجزيئات، وعددها وطاقتها الحركية الكلية. وتوجد كمية ضخمة، تسمى W، لأشكال مجهريـة متوافقـة مـع المتغيرات الديناميكية الحرارية: وتختلف عن بعـضها الـبعض بتفـصيل مواقـع وسرعات الجزيئات. وهذه المتغيرات الأخيرة المجهرية، بعـدد أكثـر مـن ذلـك ضخامة أيضا فيما يتعلق بالجزيئات، تعتبر صعبة المنال. وحيث إننا لا نعرف فى أى شكل جزيئى توجد منظومة تكون فيها المتغيرات الديناميكية الحرارية معطـاة، من الطبيعى أن نصفها بمدخل إحصائى حيث يؤثر على كل شكل W ممكن نفـس الاحتمالية I/W.

وللفيزياء الإحصائية إذن بنية نظرية احتمالية: كل شكل يناظر واقعـة، أى حالة ديناميكية حرارية بقانون احتمالية (الشكل ١، العمود الأخير). ومع أن مثـل هذه الحالة تظهر محددة جيدًا على مستوانا، يحدث أن يدخل فى المستوى المجهرى عدم يقين I، يُقاس بالبيتات بالصيغة (2). ويمكن توضيح أن خصائص عدم اليقـين هذا I هى نفسها كل تلك التى تعيدها الديناميكا الحرارية إلى الإنتروبيا S. وبالتالى فإن قيمتين I و S تتحددان، بمعامل تقريب:

$$S = k \log_2 W, \quad k = 0{,}96.10^{-23}\ JK^{-1}\ bit^{-1}. \qquad (3)$$

العدد k، وهو ثابت بولتزمان Boltzmann، يتحدد باختيار وحدة إنتروبيـا، جول لكل كالفن JK^{-1}، وهى وحدة مألوفة مناسبة لمستوانا. وصغرها يتفـق مـع ضخامة قيم W، البالغة $10^{3.10^{22}}$، عندما $S = 1\ JK^{-1}$. وحيث إن I/k هى بقيمـة عدد أفوجادرو Avogadro $6.10^{23}\ mol^{-1}$، فإن عدم اليقين $I = S/k$ فى منظومـة عيانية يكون بقيمة عدد مكوناته الابتدائية.

وحُفرت الصيغة (3) على قبر بولتزمان فى فيينا. وكان قد تـصورها منـذ ١٨٧٧ إثر جهود عنيدة ومنفردة فى عصره حيث كان أغلب العلماء فـى ارتيـاب

من الذَرِّية[١١٢] فى غياب إثبات تجريبى للبنية غير المتصلة للمادة. إنها بارزة أكثر من أى حجة. إنها تحدد طبيعة الإنتروبيا، وهى قيمة اكتفت بها الديناميكا الحرارية للحصول على وجودها التطبيقى. ولقد جعلت من الممكن للنظرية، الخاصة بالمنظومات البسيطة بما فيه الكفاية، حساب إنتروبيا هذه المنظومات بالرجوع إلى إحصاء أشكال، وفتحت كذلك الطريق إلى التنبؤ بالخصائص الفيزيائية المميزة للمواد انطلاقًا من بنيتها المجهرية. وكانت فى أصل علمين جديدين، الفيزياء الإحصائية ونظرية المعلومات، وهى التى أوحت لشانون Shannon عندما حصل، كما سبق أن رأينا، فى ١٩٤٨، على فكرة تقديم مقياس لكمية المعلومات. وبربط مفهومين غريبين فى المظهر، قد تستحق هذه الصيغة بلا شك أن تكون أيضا مشهورة مثل علاقة أينشتاين Einstein $E = mc^2$ التى تربط بين الطاقة والكتلة.

الإنتروبيا مقياس للفوضى

وقد قدمها كلاوزيوس على المستوى العيانى، أظهرت الإنتروبيا من ثم أن لها أصل "مجهرى" و"إحصائى". وحتى لو أنها ظهرت على مستوانا، لا يمكننا أن نفهم معناها إلا فى إطار فيزيائى إحصائى، حيث تحدد بعدم يقين، نقصًا فى المعلومات: إنتروبيا أى منظومة ليست سوى مقياس جهلنا بالمنظومة على المستوى المجهرى. وتوضح صيغتها (3) سبب زيادتها (لوغاريتميًّا) مع الحجم بالنسبة لغاز ما: العدد W للأشكال يكون متناسبًا، لكل جزئ، مع حجم متاح. ونفس الشيء فإن S تزداد مع درجة الحرارة (أو مع الطاقة الكامنة) لأن هناك باطراد طرقًا تقسم الطاقة الحركية الكلية بين الجزئيات عندما تزيد هذه الطاقة.

وتُفسَّر الإنتروبيا أيضا بأنها مقياس للفوضى mesure du desordre، مفهوم يشبه نقل المعلومات. ووصف رزمة بطاقات مخلوطة جيدًا بأنها مضطربة، هو القول بأننا فقدنا كل المعلومات عن تنظيمها، بحيث إننا نخصص لكل الأشكال

---

(١١٢) الذَرِّية atomisme: مذهب الجوهر الفرد أو الجزء الذى لا يتجزأ. (المترجم)

الممكنة نفس الاحتمالية، والتنبؤات التى يمكن إجراؤها على سحب ما هـــى أيـــضا غير مؤكدة كاحتمال. وبالعكس يمكن التنبؤ بيقين بكل سحب بالنسبة لرزمة بطاقات مرتبة مثلاً بنظام عادى للبريدج، والإنتروبيا الإحصائية منعدمة بالنسبة لهذا النظام المكتمل. وفى الديناميكا الحرارية فإن زيادة النظام عندما تنقص الإنتروبيا يكـــون ظاهرًا أحيانًا فى مستوانا. كذلك عندما يتحول سائل، مع تبريده، إلى بلورة، فإنـــه يمر بحالة مادة أكثر انتظامًا ظاهريًا. وزيادة الإنتروبيا عند خلط القهوة باللبن تقـــل مع زيادة الفوضى فى ترتيب الجزيئات.

ويوضح هذا التفسير للإنتروبيا المعنى المجهرى للمبدأ الثانى. وعند تحـــول تلقائى لمنظومة معزولة، فإن زيادة S التى تصاحب تغير المتغيـــرات الديناميكيـــة الحرارية يشير إلى زيادة فى عدد W للأشكال التى لا يمكن رصـــدها المـــصاحبه لها. ومعلوماتنا المجهرية الناتجة لا يمكن أن تزيد، وبقول آخر، لا يمكن للمنظومة أن تصبح أقل فوضى مما كانت عليه فى البداية. وكذلك كـــل التحـــولات الغيـــر انعكاسية، مثل انتقال حرارة جسم ساخن نحو جسم بارد، أو خليط أو احتراق، ينتج فى اتجاه تتزايد فيه الفوضى على المستوى العيـــانى. ويثبـــت تحليـــل الـــديناميكا المجهرية هذه النتيجة عن الطبيعة الإحصائية. ويعبر المبدأ الثانى إذن عـــن ميـــل المنظومة المعزولة إلى زيادة الفوضى فيها.

وعندما تتفاعل عدة منظومات فليس هناك ما يمنع أن تصبح واحـــدة منهـــا منتظمة بالتدريج حيث إن الفوضى الكلية (الإنتروبيا الكلية) تتزايد. وفـــى محـــرك حرارى، يتم الإمداد بالطاقة عن طريق مصدر ساخن، ولكن بالتخلى عن الطاقـــة فإنه يجب أن يكسب نظامًا. ومن ثم فإن "مصدر النظام" لا مفر منه: هذا هو الدور الذى يلعبه المصدر البارد (دورة تبريد فى محطة توليد الطاقة الكهربائية). وتتزايد الفوضى الكلية بسبب تدفق حرارة من المصدر الساخن نحو المصدر البارد، ونحن نستخلص الطاقة الميكانيكية بأن نحول لصالحنا جزءًا من هذا التدفق بفضل جهـــاز مثل التربينة. وبنفس الطريقة فإن تبريد ما فى داخل مبرد منزلى يزيد النظام فيـــه،

ولكن هذه الزيادة يجب أن يدفع مقابلها بزيادة أكبر، تحدث فى موضع آخـــر، مـــن الفوضى، وبالفعل فإن الكهرباء المستهلكة لجعل ضاغط المبرد يعمل لا تنتج سوى ثمن زيادة الفوضى فى محطة توليد الكهرباء. ومثال آخر هو تطور كـــائن حـــى، وهى عمليات يزداد فيها النظام على حساب الوسط البيئى.

لقد حددنا نقص المعلومات، بقيمة ذاتية subjective (أو غالبًا بـــين ذاتيـــة intersubjective بسبب المشترك بين كل المراقبين الذين لديهم نفس المعلومـــات)، وللفوضى قيمة تبدو موضوعية objective. وفى الحقيقة لـــيس النظـــام خاصـــية للأشياء يمكن تعريفها بطريقة مطلقة. فالمكتب الذى يعتبر فى حالة فوضى بالنسبة لزائر ما يمكن أن يكون منظمًا بشكل جيد بالنسبة لمن يستخدمه إذا كان يعرف أين يجد كل مستند. ورزمة بطاقات، يتم خلطها بواسطة مشعوذ حاذق، وقد كانت فـــى البداية مرتبة، قد تبدو بالنسبة لمشاهد وقد أصبحت منظمة، ومع ذلـــك فـــإن مـــن يعالجها بيده وقد تحكم فى هذا الخلط يعرف كيف يمـــنح الرزمـــة نظامًـــا تامًّـــا، محجوبًا ومعروفًا له وحده، بطريقة تجعله قادرًا على العودة إلى النظام الابتـــدائى. ويمكن بنفس الطريقة التأثير فى الفيزياء على تجارب رنين مغناطيسى نووى، يقال لها صدى اللف، حيث تزداد إنتروبيا الديناميكا الحرارية أولاً بشكل طبيعى، لكـــن تقل بعد ذلك مما يخرق المبدأ الثانى: وتصاب العزوم المغناطيسية الأولية، المتجهة بالتوازى فى البدء، بالفوضى بطريقة تزيل تمغنط المادة، ولكن يمكـــن الوصـــول بمعالجة عيانية إلى استعادة النظام الأولى المفقود ظاهريًا، كما لو أننا نرجـــع فـــى الزمن. ويستطيع القائم بالتجارب فى مثل هذه الحالة ضـــبط بعـــض المتغيـــرات المجهرية التى يتعذر بلوغها عادة بالديناميكا الحرارية. وفـــى الحالـــة المتوســـطة لإزالة التمغنط، يوجد "نظام مختفٍ" يتميز بقيم لهذه المتغيـــرات المجهريـــة قابلـــة للتحكم فيها. ويجب أن تكون حالة المنظومة هنا متحددة فى كل لحظة، ليس فقـــط بالمتغيرات الديناميكية الحرارية ولكن أيضا بالمتغيرات المختفية القابلـــة للـــضبط. ويكون العدد W المناظر أقل بكثير منه فى تعريف نجهل خلاله هـــذه المتغيـــرات المختفية، ويزداد كما يجب على كل طول العملية، كما هو الحال مـــع الإنتروبيـــا

الجديدة (3) المرتبطة بهذا الرقم. ومع أن مثل هذه التجارب تحدث فـــى مـــستوانا، فإن تحليلها يحتاج إلى تعريف أكثر دقة عن تلك الملازمة للديناميكا الحرارية.

جنى ماكسويل

ويوجد نوع آخر من خرق القانون الثانى، على الأقل ظاهريًا، فـــى تجربـــة تفكير تخيلها ماكسويل فى ١٨٦٧. لنأخذ وعائين معطيين A وB يفـــصل بينهمـــا حاجز مثقوب بثقب صغير وهما معزولان حراريًا. ويحتويان فى البداية على غاز فى حالة توازن، حيث الكثافة هى نفسها على الجانبين A وB. ويسكن أمام الثقـــب جنى، يمكنه أن يغلق الثقب كما يحلو له بمساعدة سديد خفيف تمامًا ليستخدمه دون مساهمة أىً طاقة ميكانيكية. وبسبب الاستثارة الحرارية، يمكن لـــ N من جزيئات الغاز أن تنتقل نحو الثقب قادمة من جانب أو آخر. ويدع الجنى تلك القادمة من B نحو A، ويعيد بسديده تلك القادمة من A نحو B. وينتهى الأمر بالغاز لأن يتواجد فى A، بطريقة تجعل حجمه يقل بدون ضغطه بمكبس. وفـــى هـــذه الحالـــة فـــإن إنتروبيا الغاز تنقص دون أن يكون هناك إسهام من أى شغل ولا فقد للحرارة، وهو ما يخالف المبدأ الثانى. ومع أن هذه التجربة لا يمكن تحقيقها عمليًا، فـــإن حجـــة ماكسويل لم تطرح على الأقل مشكلة تصورية جادة، واحتاج الأمر لأكثر من قرن للتفسير التام لهذا التناقض.

وحدث التقدم الأكثر أهمية فى ١٩٥٠ بواســـطة ليـــون بريلـــووين Leon Brillouin. وكان قد سبق فى ١٩٢٩ أن لاحظ ليو زيلارد Leo Szilard أن جنى ماكسويل لم يصل إلى الإقلال من إنتروبيا الغاز إلا بفضل معلومات عن ما لديـــه: من أجل اتخاذ قراره فإنه يحتاج أن يعرف على الأقل من أى جانب من الثقب يأتى الجزئ. وبعد قليل من ظهور نظرية المعلومات، قدم بريلووين صـــياغة رياضـــية لهذه الحجة. ونعرف حاليًا كيفية تشفير كمية معلومات معطاة، مثال لـــذلك، نحـــن نعرف فى أى جانب توجد كل من N جزئ التى تمثل N بتات (١ بت لكل جـــزئ حيث إن له فرصة من اثنين لأن يوجد فى A أو B). وأوضح بريلووين أن كميـــة

المعلومات التى يجب أن تكون لدى الجنى فى البداية لجعل الإنتروبيا تقل بقيمة ΔS تكون على الأقل مساوية لـــ $\Delta S/k$. وبعد الفرز واتخاذ القرار لا يصبح لدى الجنى مزيد من المعلومات سوى دور المشاهد الخارجى الذى يتأكد مـــن أن كـــل الغـــاز موجود فى A. وإذا أخذنا فى اعتبارنا تحديد $S = kI$ لإنتروبيا الفوضى الجزيئيـــة (القريب من ثابت الوحدة k)، يأتى تأثير الجنى إذن من "الانتقال إلى النظـــام" فـــى الغاز لتكوين كان لديه، مع عمليات فقد احتمالية. وبقـــول آخـــر، إنـــه ينقـــل لنـــا معلوماته، على الأقل جزء منها.

ودقق بريلووين بعد ذلك النظر فى كيف أمكـــن للجنـــى أن يحـــصل علـــى المعلومات التى يملكها. ولكشف ما إذا كان جزئ موجود فى A أو فـــى B يجـــب مثلاً رصد ذلك الأمر بصريًا. يجب فى هذه الحالة إضاءة ما فـــى داخـــل الإنـــاء بمساعدة مصدر ضوئى موجه، ثم تحليل الضوء المتشتت بواسطة الجزيئات. وهذا التشتت يفقد الإشعاع توجهاته ويجعل فوضاه تزيد، ومن ثم الإنتروبيا الخاصة بـــه. وبشكل أكثر عمومية، كل حصول على معلومات، وكل قياس، يحتاج إلى استخدام جهاز فيزيائى الذى يحدث فى قلبه تحول غير قابـــل للانعكـــاس. وكـــسب كميـــة معلومات ΔS يجب أن يدفع ثمنه كذلك بزيادة ΔS فى إنتروبيـــا الجهـــاز، زيـــادة ترتبط باللانعكاسية هذه، ونلاحظ أن ΔS يجب أن تكون مساوية على الأقـــل لـــــ $k\Delta I$. وصغر k يجعل هذه الزيادة فى الإنتروبيا ضئيلة جدا بشكل عام. غير أنـــه بالنسبة لجنى ماكسويل يتم الحصول على كمية المعلومات ΔI وتكون ضخمة حيث تصل إلى N بت. فإذا أدخلنا حينئذ فى المنظومة، بجانب الغاز نفسه، التجهيـــزات اللازمة للرصد (هكذا مثل الجنى الذى استبدل عند الضرورة بجهاز يعمل بـــشكل آلى)، فإن الموازنة الكلية للإنتروبيا تكون متفقة مع المبدأ الثانى.

وصغر k يوضح أيضا فعالية تخزين المعلومات فى المادة: إرســـال عـــدد كبير من البتَّات إلى ذاكرة جهاز كمبيوتر لا يغير البتة من الإنتروبيا الخاصة بـــه مقاسة بالوحدات الديناميكية الحرارية.

وفى آخر الأمر فإنه عند ثبات وحدات k تقريبا، يكون تعيين إنتروبيا نقص معلومات كاملاً، يمكن لإحداها أن تتحول إلى الأخرى، مع عمليات فقد احتمالية للنظام أو المعلومات. وكل كسب للمعلومات يحتاج زيادة فى إنتروبيا جهاز القياس، بكمية مساوية على الأقل، ويمكن الاستفادة من معلومة عكسيًا لإيجاد كمية مساوية على الأكثر من إنتروبيا سلبية neguentropie (أى خفض الإنتروبيا).

خلاصة

خلال العقود الماضية، تم تطبيق مفهوم الإنتروبيا أو المعلومات على مجالات متنوعة باطراد: نظرية الذاكرة، مسائل الإمثال،[١١٣] وعلم الكون، ونظرية الفوضى chaos، والمعلوماتية الحيوية bio - informatique... إلخ. واستمر هذا المفهوم أيضا فى مكابدة التحولات المتنوعة. وبينما كانت إنتروبيا الديناميكا الحرارية تصف الفوضى المجهرية المسيطرة على التوازن فى منظومة فيزيائية، استخدمت إنتروبيا كولموجوروف Kolmogorov (١٩٤٩) فى توضيح الصفة الفوضوية لديناميكية وعدم اليقين فى تطور منظومة ما. ومن جانب آخر، يمكن وصف الفوضى المصاحبة لرسالة ما أو شكل واحد، دون الاستعانة كما فى (1) بالاحتمالات P_m. وكمية المعلومات تُستبدل حينئذ بمفهوم واضح لتعقد خوارزمى[١١٤] complexite algorithmique، يتم تعريفه كما يلى. تبدأ بجعل الرسالة رقمية، أى بتمثيلها بعدد بمساعدة شفرة. ثم نتخيل كيف يمكن إنشاء هذا العدد بعمليات جبرية فى جهاز كمبيوتر مثالى، وتحدد خوارزمية طول البرنامج المعلوماتى الأكثر اقتصادية للتوصل إليه، التعقد الخوارزمى. وبالنسبة لمجموعة رسائل يتحدد متوسط هذا التعقد بنقص المعلومات. ويقوم اتجاه آخر للأبحاث الراهنة على نظرية كمية للمعلومات، من منظور إعداد فرضيات حاسوبية كمية،

---

(١١٣) الإمثال optimisation: إيجاد الحل الأمثل لمسألة متعددة الحلول – المترجم

(١١٤) الخوارزمية algorithme: طريقة أو تسلسل منهجى لحل المسائل الرياضية أو التنظيمية – المترجم

وهنا يتغير مفهوم الاحتمالية بهدف أن نضع فـي اعتبارنـا حقيقـة أن الأحجـام الفيزيائية المجهرية يتم تمثيلها بموضوعات رياضية لا تستبدل.

ومن ثم تبدو الإنتروبيا، ونقص المعلومـات، وعـدم اليقـين، والفوضـى، والتعقد، كما لو أنها تبدلات لنفس المفهوم الوحيد. وتحت أحـد هـذه الأشـكال أو غيره، ترتبط الإنتروبيا بمفهوم الاحتمالية، ويمكن تقييمها رقميًا، وهـو مـا يمثـل بالفعل أداة فعالة لتطبيقات متنوعة. وهي لا تصور شيئًا في ذاته، ولكنهـا تـصف معرفة لدينا من الممكن أن نتنبأ بها. ومن ثم فهي خاصية موضوعية وذاتيـة فـي نفس الوقت. وبشكل أكثر عمومية، فقد عرفنا منذ قرن أنه حتـى العلـوم الأكثـر صلابة، الفيزياء والكيمياء، تتدخل في الإنساني. وهي تقوم بالفعل على الميكانيكـا الكمية وعلى الفيزياء الإحصائية، والعلوم النظرية حيث مفهوم الاحتمالية لا التفاف حوله. غير أن هذا المفهوم في حد ذاته شديد التمسك بالموضوع وبالمشاهد الباحث عن وصف التنبؤات والعمل بها. ولقد أشار دافيـد رويـل David Ruelle، فـي محاضرته التي ألقاها في هذه الدورة حول الفوضى الحتمية، إلى أن الصدفة ليست سوى تعبير عن عدم يقيننا. وقد سبق أن كتب ماكسويل Maxwell: "التشوش، مثل المصطلح الملازم له النظام، ليس خاصية للأشياء المادية في حـد ذاتهـا، ولكنـه يرتبط فقط بالمخ الذي يدركها"، وهذا ما سأسمح لنفسي بترجمته بتلاعب بالألفـاظ: "الإنتروبيا لها خاصية الأنتروبي anthropique".

المواد الجزيئية أو:
من الجزئ إلى المادة... [115]

بقلم: ميشيل فيرداجويه
Michel VERDAGUER

ترجمة: عزت عامر

من المسلم به القول بأن مفهوم المادة قد قطّع تاريخ البشرية: "العصور" التى قام عليها تاريخ الإنسان تحمل اسم المواد: العصر الحجرى، العصر البرونزى، عصر الحديد، عصر السليكون أو النيلون. واحدة من هذه المواد هى التى تعتبر مادة جزيئية (عيانية macro) وهى النيلون Nylon، لكنها الأكثر حداثة، والأكثر تعقدًا، والأكثر ملاءمة.[116]

ما المادة الجزيئية؟

قبل أى شيء، من المفضل تعريف ما نفهمه من تعبير المادة الجزيئية.

المادة الجزيئية هى مادة تتكون من جزيئات.[117] والجزئ هو مجموعة ذرات تترابط بين بعضها البعض بروابط كيميائية تكافؤية إسهاميًا covalentes. والمادة materiau هى مادة substance مفيدة، تتشكل بطريقة ملائمة، لتندمج فى ترتيب ما لتوفى فيه بوظيفة بفضل خواص هذا الترتيب. ويكون هذا صلبًا فى الغالب. والمواد الجزيئية ذات تنويعة واسعة، من غطاء الخروج للنزهة المذهل فى

---

(115) نص المحاضرة رقم ٢٤٠ التى ألقيت فى إطار مشروع جامعة كل المعارف بتاريخ ٢٧ أغسطس ٢٠٠٠.

(116) Elsa Triolet, L'âge de Nylon, Œuvres romanesques croisees d'Elsa Triolet et d'Aragon, Robert Laffont, Paris, 1959

(117) Jacques Simon, Patrick Bernier, Michel Armand, Jacques Prost, Patrick Hemery, Olivier Kahn, Denis Jerome, «Les materiaux moleculaires», p. 401-404, La Science au present, Tome II, Encyclopædia Universalis, 1992.
P. Bassoul, J. Simon, Molecular Materials, Wiley, New York, 2000

١٤ يوليو ٢٠٠٠ (مركب من البوليمرات polymeres) إلى إظهار إعلانات شاشات أجهزة الكمبيوتر الصغيرة (سوائل بللورية).

المواد الجزيئية وسط المواد الأخرى

أوسع أنوع المواد استخدامًا لدى الإنسان هى المعادن، المواد الخزفية، والبوليمرات.[١١٨] وهذا التصنيف التعسفى جزئيًا، لا يتضمن المواد الجزيئية بطريقة مباشرة. لكن البوليمرات تعتبر من الجزيئات العملاقة (الجزيئات العيانية macro - molecules). وكل نوع من المادة له خصائص متميزة (ميكانيكية، وفيزيائية، وكيميائية) تناظر البنية أو نوع الروابط المعطاة: والمواد (ذات الروابط المعدنية) هى تركيبات من الذرات. وهى موصلة، وصلبة، عند درجة حرارة ذوبان عالية، قابلة للتطريق، وقابلة للتمدد، وكثيفة، عاكسة للضوء وغير شفافة. والخزفيات (روابط أيونية) هى تركيبات أيونات منفردة، وعاكسة، وكثيفة، مقاومة للميكانيكا والحرارة لكنها تتحطم وتعتبر هشة. والبوليمرات (روابط تكافؤية إسهامية) خفيفة، يسهل تشكيلها، وعازلة، وصلبة إلى حد ما، ومستقرة قليلاً فى الغالب فى درجة الحرارة. وعندما لا يتم تغطية احتياج بالأنواع الكثيرة من المواد، تتم الاستعانة بالمركبات، الخلائط المركبة من المواد، أو يتم تخليق مواد جديدة. وهناك علم حقيقى للمواد يدرسها، ويحسنها ويختلقها.[١١٩] ومن بين المواد الجديدة تُدرج على وجه الدقة المواد الجزيئية. وبعكس الخزفيات والمعادن، التى يتم الحصول عليها فى درجات حرارة عالية (ومن ثم تتكلف طاقة)، يتم الحصول على المواد الجزيئية والبولميرات فى شروط حرارة وضغط تدريجيين. وهى خفيفة، وشفافة، وغالبًا تكون ملونة بخفة، يسهل تشكيلها، وهى غالبًا ملائمة حيويًا biocompatibles وقابلة للتآكل حيويًا biodegradables، ويمكن إعادة تدويرها.

---

(١١٨) J. P. Mercier, G. Zambelli, W. Kurz, Introduction a la science des materiaux, Presses polytechniques romandes, Lausanne, 1999.

(١١٩) R. E. Hummel, Understanding Materials Science, Springer, Berlin, 1998.

وفى دورة المواد (الشكل ١)، حيث يتعاظم الاهتمام بالبيئة، تعتبر هذه الخصائص الأخيرة مهمة. غير أن المواد الجزيئية هشة وقد ينتهى عمرها بسرعة (حساسة للهواء وللضوء... إلخ).

المواد الجزيئية فى التاريخ

تستجيب أى مادة فى أغلب الأحيان لاحتياج ما، شخصى أو اجتماعى. وفى التاريخ، يناظر ظهور مواد جديدة تطور الاحتياجات وقدرة الإنسان على التحكم فى عمليات تصنيع المادة[١٢٠] (الشكل ٢). والحماية من العناصر كان وراء استخدام مواد جزيئية وهى الألياف الطبيعية (الكتان، والقنب، والقطن على أساس خَلِيُّوز cellulose[١٢١])، أو حيوانى (الصوف، والحرير على قاعدة متعددة الأمين[١٢٢])، والألياف المعدلة للمادة الأولية الطبيعية (الحرير الصناعى، والأزوتات nitrate وخلات acetate خَلِيُوز) أو مؤخرًا الألياف الصناعية تمامًا (النيلون).[١٢٣] ويعتبر التحول من الطبيعى إلى الصناعى أمرًا ثابتًا فى تاريخ المواد الجزيئية: وكانت الطبيعة والمنظومات البيولوجية مصدرًا دائمًا للنماذج والإيحاءات والأمل. وشهد العصر الراهن تسارعًا نحو استخدام المواد المركبة، وخاصة الجزيئية.

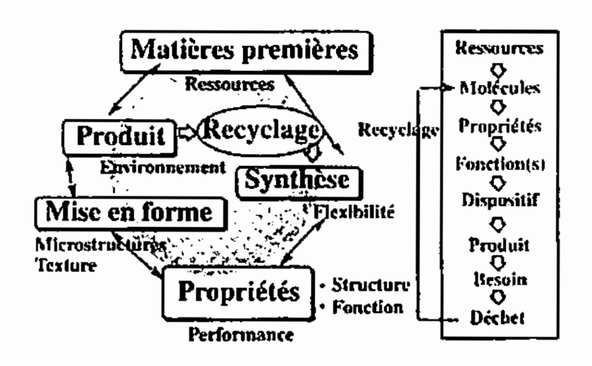
---

(١٢٠) Andre Leroi-Gourhan, L'Homme et la matiere, Albin Michel, Paris, 1971 B. Bensaude-Vincent, I. Stengers, Histoire de la chimie, La decouverte, Paris, 1993.

(١٢١) خَلِيُوز: مركب ثلاثى هو القسم الصلب الخشبى فى النباتات – المترجم

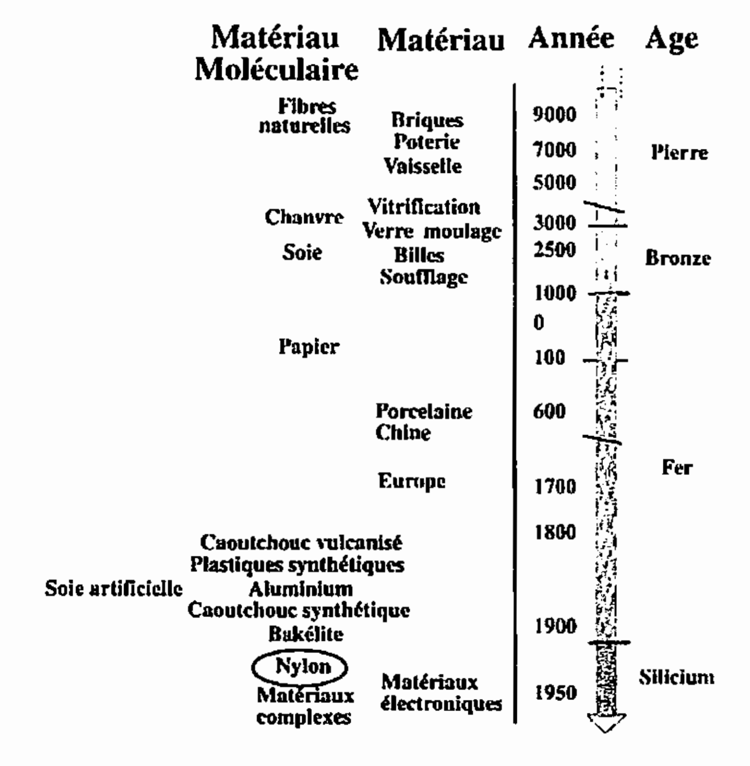
(١٢٢) متعددة الأمين polypeptides: مادة أزوتية مكونة من اجتماع عدة جزيئات من حوامض الأمين. (المترجم)

(١٢٣) Encyclopeedia Universalis, Paris, 1990, article Textiles (Fibres) Pour la Science, n° special, « Fibres textiles et tissus biologiques », decembre 1999



الشكل (١)

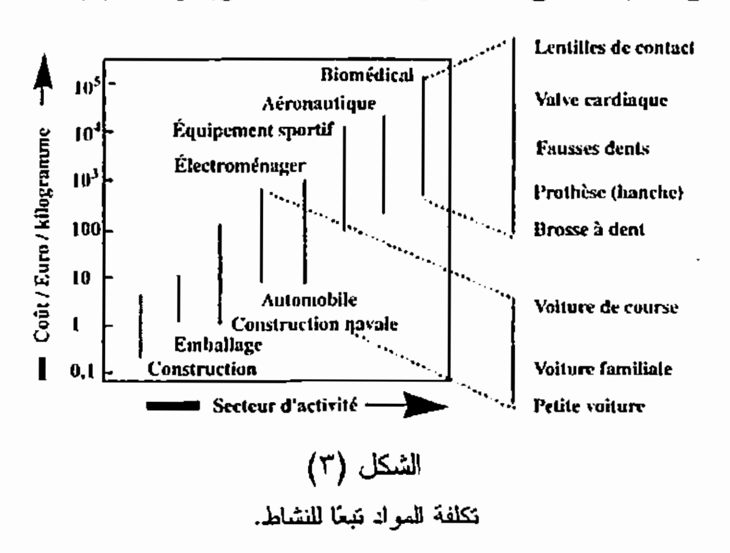
دورة إنتاج وإعادة تدوير المواد.



الشكل (٢)

تاريخ المواد.

يوضح الشكل ٣ تكلفة المواد فى الأفرع الصناعية المختلفة معبر عنها باليورو لكل كيلوجرام. وقليلاً ما تدخل المواد الجزيئية صناعات الإنشاءات. ولكن بمجـــرد أن تصبح الأوزان معيارًا للاختيار (التعبئة، والنقل)، وعندما تصبح الحاجـــات الأخـــرى معقدة (التجهيز الرياضى، والصحى... إلخ)، فإنها تحتل مكانة مهمة. وإنتاج الأعمـــال المتعددة الأساسية والتطبيقية يساهم فى رفع ســـعر الوحـــدة. مثـــال لـــذلك العدســـات اللاصقة التى تعتبر تحفًا فى الشفافية والخفة والدقة البصرية والميكانيكية..[١٢٤]



الشكل (٣)

تكلفة المواد تبعًا للنشاط.

كيف يتم تخليق مادة جزيئية؟

يعتبر إعداد مادة عملية طويلة تبدأ من المادة الأولية حتـــى المنـــتج. ولـــن نعرض هنا إلا جانبين أساسيين:

– الرابطة المكافئة إسهاميًّا covalente التى يقوم عليها وجـــود الجزيئـــات المستقرة (ثنائى الهيدروجين dihydrogene، H_2 أو فلورور الهيدروجين HF).

(١٢٤) Encyclopcedia Universalis, Paris, 1990, article Materiaux.

– التفاعل ما بين الجزيئات الذى تقوم عليه بنية الجزيئات الصلبة.

ولن نعرض سوى المشاكل بالغة الأهمية للتشكل الذى يتيح الانتقال من منظومة جزيئية، مخصص لها خصائص لازمة، إلى المادة.

ويقوم وجود جزئ على التفاعل بين الذرات التى يحتوى عليها. وبترتيب وباستيفاء المداريات الذرية تتكون مداريات جزيئية تصف الإلكترونات فى الجزئ.(١٢٥) وفى H_2، يشكل المداريان الذريان مداريين جزيئيين بطاقة أكثر انخفاضًا (يقال لها مرنة liante). ويظل المدارى الأعلى خاليًا (غير مرن antiliante) والجزئ أكثر استقرارًا من الذرات المنفصلة. وتشكل إلكترونات الترابط رابطة مزدوجة. وتكون مشتركة بالتساوى بين الذرتين. ويقال إن الرابطة ذات تكافؤ إسهامى. ولكسر الرابطة يجب الحصول على كمية كبيرة من الطاقة (نحو ٤٥٠ كيلوجول لكل مول أو $kJ \; mol^{-1}$، والمول mole هو وحدة كمية المادة). وبالعكس فإن الجزئ HF يتشكل من ذرتين مختلفتين. وتكون الرابطة HF أيضا أكثر قوة من تلك الخاصة بـ H_2: 550 $kJ \; mol^{-1}$. لكن زوجى الرابطة لا يكون مشتركًا بطريقة متساوية بين H و F، ويكون "منجذبًا attire" بواسطة ذرة الفلور، أكثر سلبية كهربائية electronegatif، ويظهر عزمًا ثنائى الاستقطاب ينتقل من الفلور نحو الهيدروجين، وتصبح الرابطة أيونية جزئيًا. وتشكل ستة إلكترونات أخرى للفلور ثلاث ثنائيات غير مرنة. وثنائى الاستقطاب الكهربائى هو سبب التفاعلات ما بين الجزيئات، وهى كذلك بمقدار قوة الفلور وذات سلبية كهربائية شديدة ومثل الهيدروجين صغيرة ويمكنها أن تقترب جدا من جار الفلور. وتوجد هذه الروابط الهيدروجينية فى الماء السائل أو الصلب (الثلج) حيث العزم ثنائى القطب الكهربائى H - O يكون مهمًا أيضا. وتفسر هذه التفاعلات بنية الثلج وتحدد درجات حرارة

---

(١٢٥) Encyclopaldia Universalis. Paris. 1990, articles Liaisons chimiques et Molecule. J. P. Malricu. ce volume

L. Salem. Molecule. la merveilleuse. Intereditions. Paris. 1979

Y. Jean. F. Volatron. Atomistique et liaison chimique. Ediscience. Paris. 1995

T. A. Nguyen, Introduction a la chimie moleculaire. Ecole Polytechnique, Ellipses. 1994

تغيرات الحالة: بالنسبة للماء، تكون درجة حرارة غليان الماء مرتفعة، ١٠٠ درجة مئوية، بسبب الروابط الهيدروجينية. وبالنسبة لثنائي الهيـــدروجين dihydrogene، ليس له تركيزات شحنة كهربائية موجبة أو سالبة apolaire، تكون التفاعلات على العكس ضئيلة جدا (تفاعلات فان دير فال van der Waals) وتكون درجة الغليـــان منخفضة جدا (– ٢٥٣ درجة مئوية!). وعندما نضع كلوريـــد الـــصوديوم NaCl (ملح الطعام) في الماء، تتفكك البللورة و"تصبح محلولاً" وكذلك الأيونات الموجبـــة للصوديوم Na^+ (الكاتيونات)[١٢٦] والكلوريـــد الـــسالب -Cl (الأنيونـــات)،[١٢٧] أي تحيط نفسها بجزيئات ماء بسبب تفاعلات الأيون ثنائي الاســـتقطاب ion - dipole: ويكون ذلك على قاعدة خصائص مذيب من الماء وخصائصه الغريبة في نقل المادة في البيولوجيا والجيولوجيا: الماء مذيب للمواد ثنائية القطب أو الأيونية (بالتفاعـــل إلف الماء hydrophile) ولا يتفاعل مع الجزيئات (أو أجزاء الجزيئات) غير ثنائية القطب (بالتفاعل راهب الماء hydrophobe).

وببنية طبيعة الرابطة في الجزيئات وبالتفـــاعلات بـــين الجزيئـــات تولـــد الخصائص، والوظيفة والفائدة للمادة.[١٢٨]

الجزيئات والمواد الجزيئية في الحياة اليومية

نستخدم كل يوم مواد جزيئية:[١٢٩] ألياف نسيج (ملابس)، صـــابون (مـــواد غسيل)، وبلورات سائلة (عرض إعلانات: ساعات، وحاســـبات، وأجهـــزة قيـــاس درجة الحرارة) ولن نتناول منها سوى ثلاثة أمثلة.

---

(١٢٦) الكاتيون cation: أيون موجب الشحنة أو مجموعة منه تتحرك نحو القطب الـــسالب فـــي التحليـــل الكهربائي. (المترجم)

(١٢٧) الأنيون anion: أيون سالب الشحنة خاصة الأيون الذي ينتقل لأنود (مصعد) في التحليل الكهربائي. (المترجم)

(١٢٨) P. W. Atkins, Molecules, Freeman, New York, 1987 et trad. fr.

(١٢٩) Ben Selinger, Chemistry in the Market Place, Harcourt Brace, Sidney, 1998.

بولياميدات ومتعددات الإستر(١٣٠)
Polyamides polysters

تعتبر ألياف النسيج الصناعية جزيئات (عيانية macro)، تتشكل بإضافة أو بالتكثيف المتعدد لجزيئات صغيرة معينة: وهى تتكون من سلاسل طويلة.(١٣١) وتقوم خصائص المادة على بنية جزيئات البداية، وعلى تفاعلات بين السلاسل، ثم على التشكل. وهكذا فإن البولياميدات(١٣٢) هى بوليمرات يتم الحصول عليها بواسطة تخليق تجميعات أميد(١٣٣) أو هضميد peptidique، R-CO - NH - R`، بينما متعددات الإستر تحتوى على تجميعات إستر، R - CO - O - R`. والرابطة الهيدروجينية فى البولياميدات تقوى التفاعلات بين السلاسل، ومن ثم الخصائص الميكانيكية للبوليمرات، التى تعتبر ممتازة (الشكل ٤). وفى مقابل ذلك فإنها تتيح تفاعلاً مع جزيئات الماء: النيلون، الذى يعتبر بولياميد، يحتفظ بالماء أكثر من متعددات الإستر (البوليسترات) (التى يمكن استخدامها من ثم كطلاءات عند التماس مع الماء). والتفاعلات الأخرى بين السلاسل، مثلاً، تفاعلات فان درفال بين النوى العطرية فى كيفلار Kevlar (الشكل ٤)، فتحسّن الخصائص الميكانيكية: ويستخدم الكيفلار فى النسيج الحامى من الرصاص.

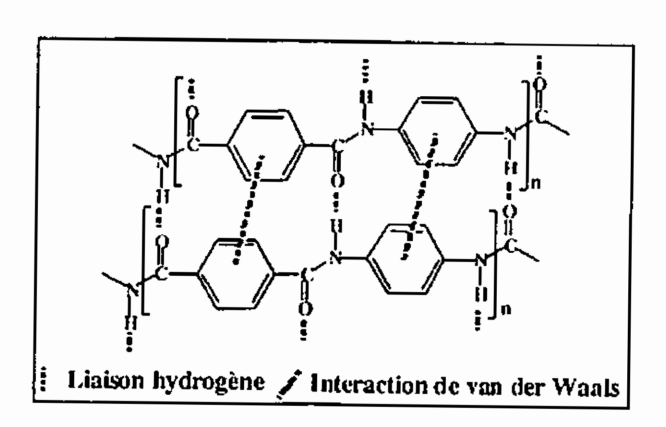
---

(١٣٠) Jean Bost, Matieres plastiques (Tomes I et II), Technique et Documentation, Paris, 1985. Groupement Fran"ais des Polymeres, Les polymeres, Paris.

(١٣١) Encyclopa!dia Universalis, Paris, 1990, articles Macromolecules, Polymeres et Textiles (Fibres).

(١٣٢) بولياميد poyamide: جسم ينتج عن تفاعل جسم كثير الأحماض مع جسم أمينى. (المترجم)

(١٣٣)



الشكل (٤)

التفاعلات ما بين السلاسل في الكيفلار.

وأدت الحاجة إلى المواد المركبة إلى تجهيز المركبات composites. وهكذا فإن غطاء نزهة قيلولة ١٤ يوليو ٢٠٠٠ جمع بشكل ماكر العديد من المواد الجزيئية: ألياف خَلِيُوز cellulose طبيعية، مترابطة بواسطة السحق مع مستحلب مائي لخلات أثيلين ethylene - acetate الفينيل vinyle، وبولي إيثالين polyethylene لدعامة السطح الخلفي غير المنفذة للماء، والإستيرين بيوتادين styrene - butadiene في مستحلب مائي لربط كل شيء. والطباعة هي طبع على الحرير بأحبار تكون الرابطة فيها بقاعدة بلمرة copolymere بيوتادين. ومادة تكثيف القوام هي الراتنج الأكليري acrylique. وتحتوي الأحبار على راتنجات أكليرية وصبغات معدنية وعضوية مستثناة من المعادن الثقيلة.[١٣٤] وتكسية القطار بالغ السرعة Mediterranee "البحر الأبيض المتوسط"، المعروفة لدى مصمم أزياء كبير، هي أيضا مركب من مواد جزيئية، تم اختيارها بذكاء وأعدت بشكل فني.[١٣٥]

---

(١٣٤) Communication de la societe Fort Williams (Lotus), Gien.

(١٣٥) Communication du service commercial de la SNCF, Paris.

الصابون فى مواد الغسيل[١٣٦]

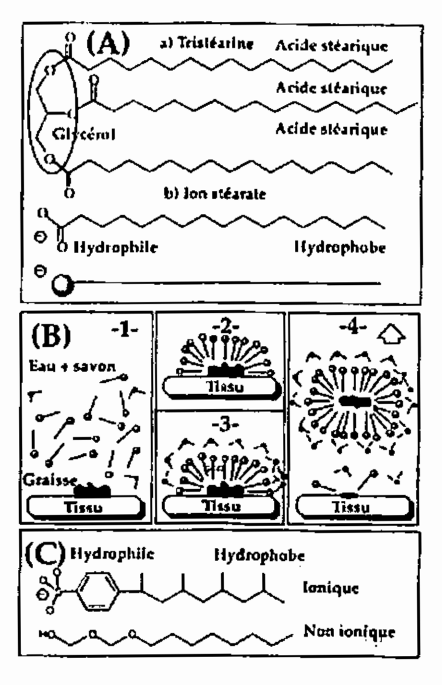
يتم الحصول على مواد الصابون انطلاقًا من عنصر دهنـى، يتـشكل مـن جليسرين glycerol وأحماض فحمائية carboxyliques ذات سلاسل دهنية طويلـة $-(CH_2)_n - CH_3$ (الشكل ٥أ). والإستيرين stearine مُعالَج ساخنًا بقاعدة تعطى صابون، ودهنات sterate الأنيون anion. والحد الأقصى للفحمـائى carboxylate يكون مشحونًا وراهبًا للماء، والحد الأقصى الدهنى aliphatique يكون إلف مـاء. ويتعلق الأمر بجزئ إلف للجـانبين amphiphile أو "مـادة ذات سـطح حيـوى surfactant". والدهن غير قابل للذوبان فى الماء: وبقعة دهن على نسيج لا تـذوب فى الماء النقى. حينئذ نضع صابون فى الماء (الشكل ٥ ب، الرسم التخطيطى ١)، يتفاعل الحد الأقصى راهب الماء مع الدهن راهب الماء (٢)، والحد الأقصى مـن إلف الماء تذوب بالماء (٣). وعندما يصبح عدد التفاعلات كافيًا، يُسحب الدهن كليًّا أو جزئيًّا (٤). ويُفضل التنظيف بالطبع عند درجة حارة واستثارة مناسبين. وتعطى المواد ذات السطح الحيوى تصورًا جديدًا لاسـتبدال المنتجـات الطبيعيـة (مـواد الصابون الناتجة عن الدهون الحيوانية أو النباتية) بمشتقات التخليـق الـصناعى: الفحمائيات carboxylates ليست قابلة للذوبان جيدًا فى وجود أيونات الصوديوم أو البوتاسيوم فى ماء الغسيل[١٣٧] "العسيرة" ويتم استبدالها بمركبات أكثر قابلية للذوبان مثل البنزين الكبريتى benzenesulfonate ذى السلـسلة المتفرعـة، الـذى يـتم الحصول عليـه انطلاقًـا مـن فـضالة الـصناعة النفطيـة لميثيـل البروبـان methylpropene، من البنزين ومن حامض كبريتى. وهذا أحد "المنظفات الأنيونية anionique" لمواد الغسول. والصابون يصور أيـضا الاهتمـام بالبيئـة: ليـست السلاسل ذات التفريعات قابلة للتحلل الحيوى وتعرقل الميـاه، مـن هنـا ظهـور منظفات أخرى فى السوق "غير أيونية"، وغير متفرعة، وكلها قابلة للذوبان أيـضا

---

(١٣٦) Encyclopædia Universalis, Paris, 1990, article Corps gras.
Ben Selinger, Chemistry in the Market Place, Harcourt Brace, Sidney, 1998.

(١٣٧) الغسول lessive: أو الغاسول، محلول قلوى يذاب فى الماء لتنظيـف الغـسيل. محلـول الـصودا يستعمل فى صنع الصابون. (المترجم)

بفضل مجموعتين خصائصيتين fonctionnellls همـــا الكحـــول والأثيـــر ether (الشكل ٥ ج).



الشكل (٥)

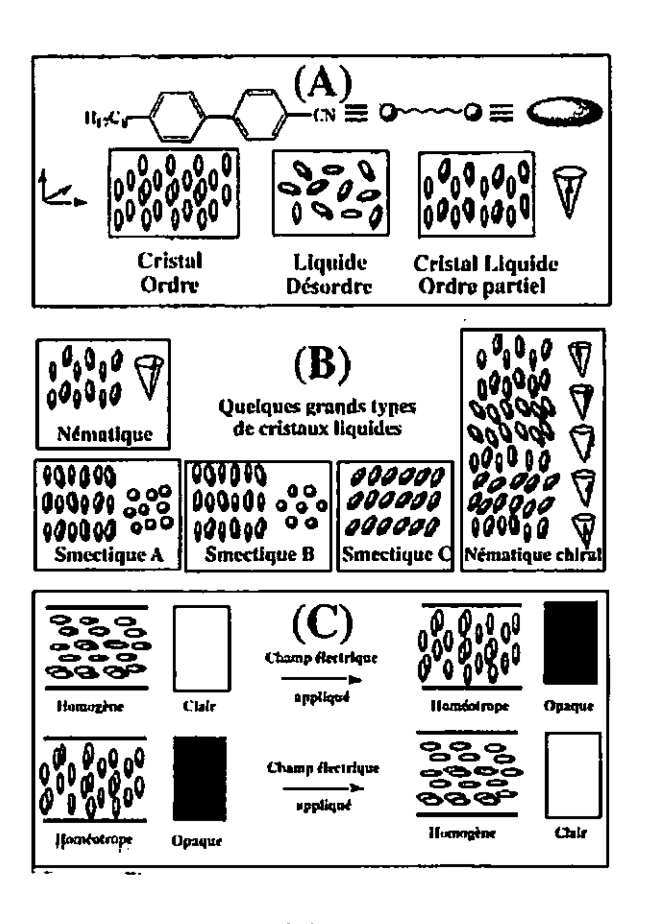
(أ) أجسام دهنية وصابون، (ب) تنظيف بقعة دهن،

(ج) مواد ذات سطح حيوي أيونية وغير أيونية.

بللورات سائلة(١٣٨)

البللورات السائلة مواد جزيئية تمثل حالة جديدة للمـــادة، حالـــة بـــين الـــسائل والبلورة mesomorphe، يكون تنظيمها متوسطاً بين النظام ثلاثـــي الأبعـــاد للبلـــورة والفوضى النسبية للسائل (الشكل ٦ أ). ولا تمثل درجة حرارة تغير حالـــة الـــسائل – الصلب لكنها تمثل درجات حرارة مناظرة لتنظيمات متنوعة ما بين الجزيئات: بلورات

(١٣٨) Encyclopcedia Universalis, Paris, 1990, article Cristaux liquides et Mesomorphe (Etat).



الشكل (٦)

(أ) طور بين السائل والبلورة، حالة جديدة للمادة،

(ب) أنواع مهمة من البلورات السائلة، (ج) مبدأ إظهار الإعلان.

سائلة nematiques وخزف smetiques... إلخ (الشكل ٦ ب). وتقوم تلك الخصائص الاستثنائية على تنظيم ذاتي تجميعي للجزيئات متباينة الخواص anisotropes،أى التى ليس لها نفس الخواص فى الأبعاد الثلاثة للمكان (جزيئات ممددة). ويطلق على الاتجاه الذى تتوجه فيه الجزيئات فى المتوسط الخط الدليلى directrice. والتفاعلات بين الجزيئات التي تقودها إلي الحالة بين السائل والبلورة

تكون ضعيفة ومن نوع فان دير فال.(١٣٩) وعند تحميل مجال كهربائى تتجه المادة جزيئا إلى الإقلال من طاقة المنظومة. وإذا وضعنا بلورة سائلة بين صفيحتين، إحداهما تستقطب الضوء، والأخرى تحلله، يمكن تنظيم الاستقطاب بطريقة تمنع مرور أى ضوء (الشكل ٦ ج). وتحميل مجال كهربائى يوجه الجزيئات فى اتجاهات مختلفة ويتيح مرور الضوء: وينتقل الجهاز من الأسود إلى عديم اللون (أو العكس)، ذلك هو مبدأ إظهار الإعلانات affichage على الشاشة. والأجهزة الإلكترونية الأكثر فأكثر تجهيزًا (بلورات سائلة nematiques "فائقة الالتواء" والشاشات "ذات القوالب النشطة" حيث يرتبط ترانزستور مع كل نطاق للبلورة السائلة) مهيأة لتسريع سرعة إظهار الإعلانات. وبعض البلورات السائلة الأخرى (خيطية يدوية chiraux cholesteriques) منتظمة بطريقة تجعل الخط الدليلى يدور بانتظام حول محور عمودى على هذا الخط. ويستعيد الخط الدليلى نفس التوجه بخطوة p، التى تعتمد على انعكاس الضوء بواسطة مركب. وعندما تتغير درجة الحرارة تتغير p (بالتقلص أو التمدد الحرارى) وتغير البلورة السائلة من لونها: وأجهزة قياس درجة الحرارة (ترمومترات) التى تعتمد على هذا المبدأ منتشرة جدا.

إعداد مواد خصائصية جديدة

إحدى المسائل التى تواجه المختبرات الجامعية والصناعية هو إعداد مواد خصائصية جديدة fonctionnels. ويستخدم مفهوم الوظيفة هنا خلافًا للبنية structure: يدعّم الإسمنت الخصائص البنيوية. ويدعّم بوليمر العدسات القابلة لطرحها جانبًا عدة وظائف (تصحيح النظر، الشفافية، نفوذية الديو dioxygene، والتآلف مع الماء hydrophilie). وتوضح الأمثلة التالية أن البنية الجزيئية تتحكم فى الخصائص.

---

(١٣٩) Encyclopredia Universalis, Paris, 1990, article van der Waals.

يتم تعيين لون المركبات الجزيئية بطريقة تجعلها تتفاعل مع الضوء: يمكنها نقل الضوء، وجعله ينتشر وينعكس بطريقة أكثر أو أقل تعقيدًا تبعًا للبنية الجزيئية وللبنية المجهرية للمادة.(١٤٠) ويتكون الضوء أحادى الطول الموجى monochromatique ذو الطول الموجى λ من فوتونات طاقتها hν (حيث h هو ثابت بلانك Planck و ν تردد الضوء). والضوء المرئى المناظر لأطوال موجات تتراوح بين ٤٠٠ و ٨٠٠ نانومتر. ويناظر امتصاص الضوء تحريك إلكترون مدارى جزيئى مشغول نحو مدارى شاغر. وما يتم امتصاصه هو فقط الفوتونات التى تناظر طاقتها بالضبط الفرق فى الطاقة بين المستويات المشغولة والشاغرة. وبالانتقال ترى العين أطوال الموجات التى لم يتم امتصاصها: إذا كانت مادة تمتص فى الأحمر (٦٠٠ – ٨٠٠ نانومتر)، فإنها تظهر زرقاء بالنقل. ويمكن تغيير بنية الجزيئات لتعديل الطاقات المدارية ومن ثم اللون. وتحتوى الفوة،(١٤١) المستخرجة من جذر Rubia Tinetorum، على أليزارين(١٤٢) الذى يمكن إنتاجه صناعيًا (الشكل ٧). ومعرفة البنية الجزيئية للصبغات (أليزارين والنيلة indigo) هى التى أتاحت للصناعة الكيميائية الألمانية، فى نهاية القرن التاسع عشر ترسيخ تفوقها فى هذا المجال، مع تقويض صناعة استخراج الصبغات الطبيعية.(١٤٣) وبعيدًا عن اللون، فإن تفاعل الضوء مع المواد له تطبيقات متعددة: يُنتج غياب الامتصاص موادًا شفافة (بوليمرات العدسات العينية)،(١٤٤) وكريمات الحماية من الشمس أو النظارات الشمسية (زجاج فوتو photochromes)(١٤٥) يحمى من الأشعة فوق البنفسجية بجزيئات عضوية معروف عنها أنها توقف كل أو جزء من

---

(١٤٠) Encyclopredia Universalis, Paris, 1990, article Couleur.

(١٤١) الفُوَّة garance: نبات زراعى صيفى. (المترجم)

(١٤٢) أليزارين alizarine: مركب أحمر برتقالى يستعمل فى الأصباغ. (المترجم)

(١٤٣) Pour la Science, Dossier « La couleur », avril 2000, notamment G. Bram, N. T. Anh, L'avenement des colorants synthetiques p. 52.

(١٤٤) Communications de la societe Ciba, Paris.

(١٤٥) Communications de la Societe Essilor, Paris.

الأشعة (شاشة A و B)، مثلما يعمل الأوزون فى الطبقة العليا من الغلاف الجــوى. والمواد الأخرى المشابهة التى يعبرها الضوء بتردد معروف، تُوجِد ضوءًا بتــردد مضاعف أو ثلاثة أضعاف (مواد بصرية غير خطية). وتبث منظومــات أخــرى الضوء بإلغاء تمايز desexitation جزيئى مستثار: زجاج مضىء، ديود (صــمام ثنائى) منير بدون حرارة، قــضيب مــضىء بإثــارة كيميائيــة بــدون حــرارة chimiluminescent على أساس ليمينول luminol. ويبقى الخط "الأكثر بياضًا من الأبيض" جميلاً وجيدًا: لا يمتص الضوء، ولا يشتته ويبثه بفضل إضافات مــضيئة بدون حرارة luminescentes بروكس peroxygenes موضــوعة فــى الأنــسجة بواسطة غَسول![146]

Anthracène —Oxydation→ Alizarine

الشكل (٧)

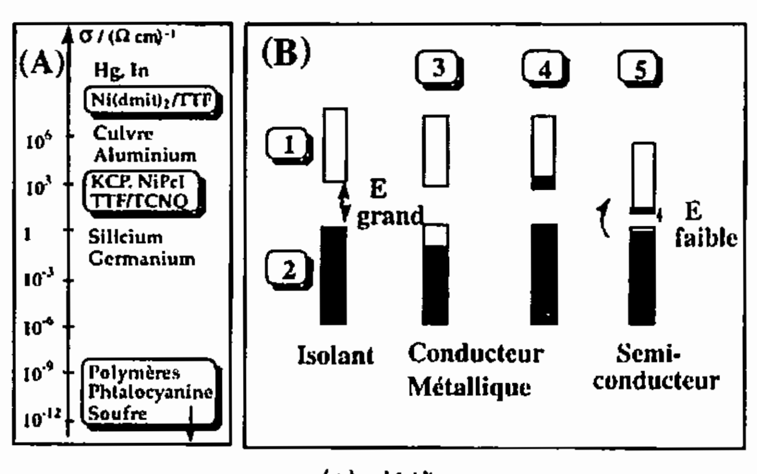
إعداد بنية جزيئية للأليزارين.

الخصائص الكهربائية

تقيس التوصيلية قدرة جسم على توصيل التيار. وهى مقادير فيزيائية يتغيــر أغلبها: وهناك أكثر من ٢٠ ترتيبًا للمقدار بين المــواد الأكثــر عــزلاً والأكثــر توصيلاً. وحتى الموصلات الفائقة لها توصيلية تميل إلى اللانهاية. وتعتبر المــواد الموصلة المعدنية بشكل عام معادن أو أكسيدات. والمواد الجزيئيــة فــى أغلبهــا عازلة، لكن علماء الكيمياء نجحوا فى تحويل بعض منها إلى موصــلات معدنيــة. والفكرة بسيطة: يُوضع جنبًا إلى جنب عدد لانهائى من الذرات، يتم تكوين شــريط طاقة بحجم محدود،مكون من مستويات لانهائية (أو مداريات) (الشكل ٨، الرســم البيانى ١ – ٥). عندما يكون الشريط خاليًا ومنفصلاً فى الطاقــة عــن الــشرائط

(١٤٦) Ben Selinger, Chemistry in the Market Place, Harcourt Brace, Sidney, 1998.

الأخرى (١)، لن يكون هناك لا إلكترون ولا توصيل. وعندما يكون الشريط ممتلئ، فإن كل.O. M يحتوى على إلكترونين لا يمكن تحريكهما (عازل). ومن أجل أن توجد توصيلية، يجب أن تكون بعض مستويات الشريط خالية (خالية أو خالية جزئيًا – ٣,٤). ويناظر شبه الموصل الحالة ٥. يمكن للشريط أن يكون مبنيًا



الشكل (٨)

(أ) مواد موصلة، (ب) روابط وموصلية.

بمداريات ذرية من الكربون فى بوليمر مثل متعدد أسيتيلين polyacetylene أو برص جزيئات (رباعى ثيافولفالين tetrathiafulvalene (TTF) أو رباعى سيانوكوينوديماثان tetracyanoquinodimethane (TCNQ). ومتعدد الأسيتيلين polyacetylene عازل. وعند أكسدته، ترتفع الإلكترونات في شريط واحد يصبح مشغولاً جزئيًا وتصبح المادة موصلة. ويتعلق الأمر بنظام نشيط استحق أن يعطى جائزة نوبل ٢٠٠٠ لثلاثة باحثين أمريكيين ويابانى (أ. ج. هيجير A. J. Heeger وأ. ج. ماكدريارميد A. G. MacDiarmid وه. شيراكاوا H. Shirakawa).(١٤٧)

(١٤٧) L'actualite Chimique, Societe Fram;;aise de Chimie, novembre 2000, p. 64.

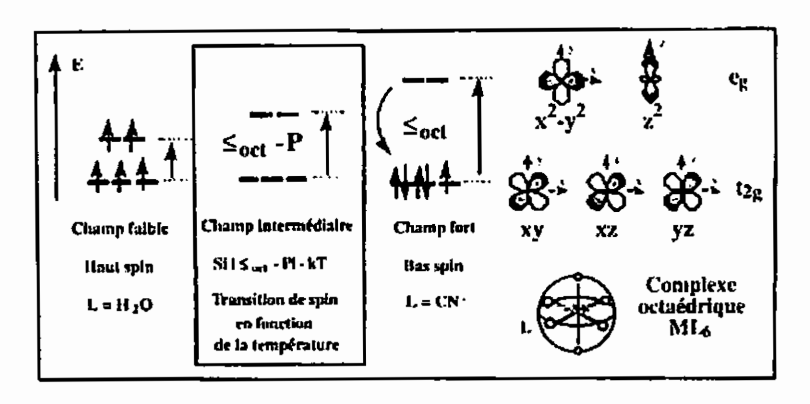
الخواص المغناطيسية[١٤٨]

وهنا أيضًا، تعتبر المواد المغناطيسية التقليدية معادن أو أكسيدات (المغناطيس المنزلى والمحركات... إلخ). ويعرف علماء الكيمياء حاليًا كيف يبنون موادًا مغناطيسية جزيئية، انطلاقًا من مركبات من عناصر وسيطة أو جذور عضوية مستقرة. وكل إلكترون يصاحبه لف $S = 1 / 2$ وعزم مغناطيسى أولى. وتمثل العناصر الوسيطة element de transition ٥ مداريات d حيث يمكن أن تتخذ ١٠ إلكترونات مكانها. وتتكون البيئة الكيميائية للمعدن من جزيئات يطلق عليها روابط تساهمية للتكافؤ ligands، تتيح ضبط طاقة المداريات وطريقة الملء بالإلكترونات: فى مركب ذى ثمانية سطوح ML_6، مثلاً، يكون العنصر الوسيط محاط بستة جزيئات. ويتيح التماثل التنبؤ بأن المداريات الخمسة d فى المركب تكون منفصلة إلى مجموعتين: ثلاث مداريات تسمى t_{2g}، ومداريان يسميان e_g منفصلان بطاقة Δ_{oct} تتغير مع الروابط التساهمية للتكافؤ. والنظرية التى تصف الظاهرة تحمل اسمًا أنيقًا "المجال البلورى champ cristallin" أو "مجال الروابط التساهمية للتكافؤ". وللإلكترونات حينئذ الاختيار: احتلال أعلى المداريات، الذى يكلف بالنسبة للمدارى eg الطاقة Δ، أو تضع نفسها فى أزواج فى نفس المدارى (الذى يكلف طاقة تزويج p). لنأخذ مثالاً حول ٥ إلكترونات (الشكل ٥):

- عندما تكون $\Delta < p$ يكون المجال ضعيفًا واللف قويًا (S = مجموع اللف الخمسة المتوازية = ٥/٢).
- عندما $p < \Delta$ تتجمع الإلكترونات بالأزواج فى المداريات t2g، ويكون المجال قويًا واللف ضعيفًا (S = ١ /٢).

---

(١٤٨) O. Kahn, Molecular Magnetism, VCH, New York, 1993.
M. Verdaguer et al., Images de la Physique, CNRS, Paris, 2000.



الشكل (٩)

شكل إلكترونى لمجال الروابط غير التساهمية للتكافؤ.

وفى الموقف المتوسط حيث Δ تساوى تقريبًا p، قد يكون للمركب لف قوى أو ضعيف، متناسبًا مع القيود المفروضة (درجة الحرارة، والضغط، والضوء). تلك هى نظرية انتقالية اللف الذاتى transition de spin الذى يظهر بتغير الخصائص المغاطيسية وباللون (لأن Δ تتغير عند الانتقال). وعندما يظهر الانتقال عند درجة الحرارة المحيطة، يمكن أن يمثل الظاهرة التى يطلق عليها التخلف hysteresis: درجة حرارة الانتقال "لف قوى لف ضعيف" (التى تتميز مثلاً بتغير فى اللون أبيض أحمر) تختلف عن تلك المتعلقة بالانتقال " لف ضعيف لف قوى" (التى تتضمن، فى مثالنا، تغيرًا أحمر أبيض). هذه منظومة ثنائية الاستقرار "ذات ذاكرة" فى بعض الأنواع، التى "تتذكر" تاريخها (الحرارى)، ويمكن استخدامها فى إظهار الإعلانات.[١٤٩]

وبعيدًا عن هذا المثال، فإن تطبيق قواعد سهلة تتيح إنشاء مادة مغناطيسية. عندما يشغل إلكترونان مداريان فى ذرتين مجاورتين A وB، تكون هناك ثلاث حالات:

(١٤٩) O. Kahn, «Magnetisme moleculaire », La Recherche, Paris, 1994.

- عندما يُسترجع المداريان كما هو الأمر فى حالة جزئ ثنائى الهيدروجين، نحصل على زوج مضاد حديدى مغناطيسى antiferromagnetique بين اللفين (ويكون اللفين فى اتجاهين متعارضين، غير متوازيين، واللف الكلى

$$(S_t = S_a - S_b = 0)$$

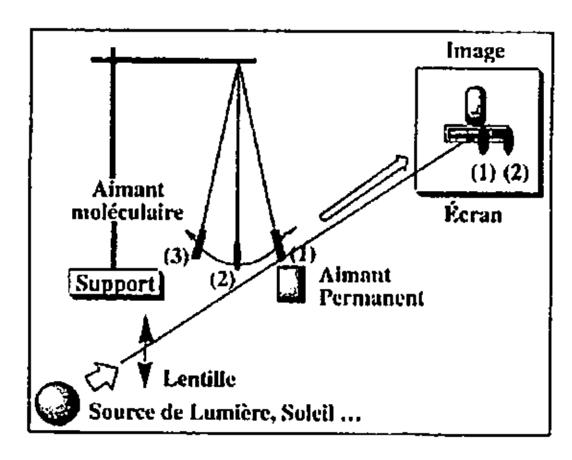
- عندما لا يُسترجع المداريان (يكونان متعامدين)، يتجه اللفان بالتوازى ويكون التزاوج حديدى مغناطيسى

$$(S_t = S_a - S_b = 1)$$

- وينشأ وضع مسل عندما يُستعاد اللفان ويكون عدد الإلكترونات مختلفًا فى A و B، عندئذ ($S_t = S_a - S_b \neq 0$)، ولا يكون اللف الناتج منعدمًا. وبشكل متناقض ومثير للجدل، يُنتج التضاد الحديدى المغناطيسى antiferromagnetisme نقيضه، مغناطيسية ناشئة. واستحقت هذه الفكرة جائزة نوبل التى حصل عليها لويس نيل Louis Neel. ومع المد التدريجى للتفاعل فى الأبعاد الثلاثة للمكان، حتى اللانهاية، فى درجة حرارة حرجة محددة T_{curie} ظهر نظام مغناطيسى على مسافة بعيدة أو يكون كل اللف الضخم مرتبًا فى اتجاه وكل اللف الصغير مرتبًا فى الاتجاه العكسى. كذلك فباستعمال استراتيجية المداريات المتعامدة [أى سيانور كروم chromicyanure البوتاسيوم (٣ مداريات t_{2g}) متحدة مع نيكل II (٢ مدارى e_g)]، حصل فيرونيك جاديت Veronique Gadet على مغناطيس حديدى مغناطيسى فى درجة حرارة كورى Curie، ٩٠ كلفن، وهى أعلى من درجة حرارة تسييل الأزوت السائل، ٧٧ كلفن.(١٥٠) وباستخدام استراتيجية المغناطيسية الحديدية ferrimagnetisme، حصلت سيلفى فيرلاى Sylvie Ferlay على مغناطيس يتجه قليلاً تحت درجة الحرارة المحيطة (٤٢ درجة

(١٥٠) V. Gadet et al., J. Am. Chem. Soc., 1992, 114,9213-9214.

مئوية أو ٣١٥ كلفن).[١٥١] وهناك نقطتان يجب الإشارة إليهما في هذه النتيجة: الصفة المنطقية للمدخل وإمكانية أن يتيح من الآن فصاعدًا طرقًا للتطبيقات العملية للمغناطيسات ذات الأصل الجزيئي. ويوجد مثال موضح في الشكل ١٠. المغناطيس ذو الأصل الجزيئي في أنبوبة في غاز خامل (أرجون) ولأنه يتعرض للهواء، يفقد خصائصه. وهو معلق في نقطة ثابتة، مثل بندول. عندما يكون باردًا، ينجذب بمغناطيس دائم (1). وعند تلك النقطة يتم تسخينه بواسطة حزمة ضوئية (مصباح، شمس). عندما تتجاوز درجة حرارته حدًا معينًا، لا يعد منجذبًا بواسطة المغناطيس ويتجه إلى الرأسي (2). وخارج الحزمة يبرده الهواء المحيط (3) وينجذب من جديد: ومن هنا تكون الحركة متذبذبة حيث الطاقة الضوئية تتحول إلى طاقة حركية، باستعمال مصدرين مجانين للطاقة: الطاقة الشمسية والهواء المحيط. وهكذا أمكن إنتاج ملايين الدورات بدون إرهاق المنظومة.



الشكل (١٠)

تحول الطاقة الشمسية إلى طاقة ميكانيكية.

(١٥١) S. Ferlay et al., Nature, 378, 701, 1995.

ويعتبر البحث عن مواد مغناطيسية جزيئية جديدة مجالاً بالغ النشاط، علـــى المستوى القومي والدولي. ويمكن لبعض المواد أن تقدم عدة خصائص (مغناطيسية معدلة بواسطة الضوء للتسجيل المغناطيسي الـضوئي photomagnetique)،[١٥٢] ومغناطيسات نشطة بصريًا (التي تجعل الضوء المستقطب يدور تلقائيًا إلى اليمـــين أو إلى اليسار[١٥٣])...

مواد للإلكترونية الجزيئية[١٥٤]

أحد التطورات الأكثر إثارة هو ذلك الخاص بمواد للإلكترونيـــة الجزيئيـــة electronique moleculaire. وتحت هذا المصطلح تختفي تفسيرات مختلفة: مواد جزيئية للإلكتروني (وتعتبر البلـــورات الـــسائلة أو البـــوليمرات أمثلـــة لهـــا) أو الإلكتروني على مستوى الجزئ. وكل الأمثلة التـــي قـــدمناها حتـــى الآن تعتبـــر مجموعات عيانية للجزيئات، أي أوزان جزيئية للجزيئات. ويتطور البحث لمعرفـــة وتحقيق جزيئات جاهزة في تجارب إلكترونية على هوية جزيئية مفـــردة وبـــشكل خاص بتقنيات مجهرية في مجال قريب (حيث يلعـــب الجـــزيء دور الموصـــل، والديود، والديود الضوئي photodiode... إلخ). ومثال لذلك يمكن لحركة التصميم بحجم صغير للإلكتروني (الإلكترونيات المحمولة، تسجيل الكميات الأكثـــر فـــأكثر ضخامة للمعلومات على أسطح أصغر فأصغر، والحساب الكمي... إلخ) أن تـــصل إلى إنجاز أجهزة تتيح تخزين معلومات على أعلى مستوى، تلك الخاصـــة بجـــزئ واحد.[١٥٥] والحاضر يتصرف منذ الآن في المستقبل.

---

(١٥٢) M. Verdaguer, Science, 272, 698, 1996.
A. Bleuzen, J. Am. Chem. Soc., 2000, 122, 6648.
C. Cartier ibid. 6653. d) H. Hashimoto et ai., ibid. 704.

(١٥٣) M. Gruselle, C. Train, travail en cours.

(١٥٤) M. C. Petty, M. R. Bryce, D. Bloor, Molecular Electronics, Edward Arnold, Londres, 1995
J. Jortner, M. Ratner, Molecular Electronics, IUPAC, Blackwell Science, 1997.

(١٥٥) Gatteschi, R. Sessoli et al., Nature 1993, 365, 141.
V. Marvaud, travail en cours.

خلاصة

فى عالم يتحرك نحو مزيد من التعقد، لن يكون التطوير لمــواد جزيئيــة إلا فى مقدمته. والإمكانيات التى تقدمها مرونة الكيمياء الجزيئية والجزيئيــات الفائقــة التى تم افتتاح هذه الدورة من المحاضرات بهــا،[١٥٦] وكيميــاء معــادن التحــول وكيمياء الكربون، هى من الناحية الأساسية غيــر مستكــشفة لكنهــا هائلــة.[١٥٧] والمعرفة الأساسية متعددة العلوم لخصائص المادة، وقدرة الكيمياء على الـسيطرة على التخليق الاصطناعى للحصول على الخصائص المطلوبة يمكن أن تتيحا ســد الاحتياجات الجديدة للإنسان وللمجتمع بشكل أفضل فأفضل.

وعلى أن يتم استخدامها بشكل جيد.

شكر

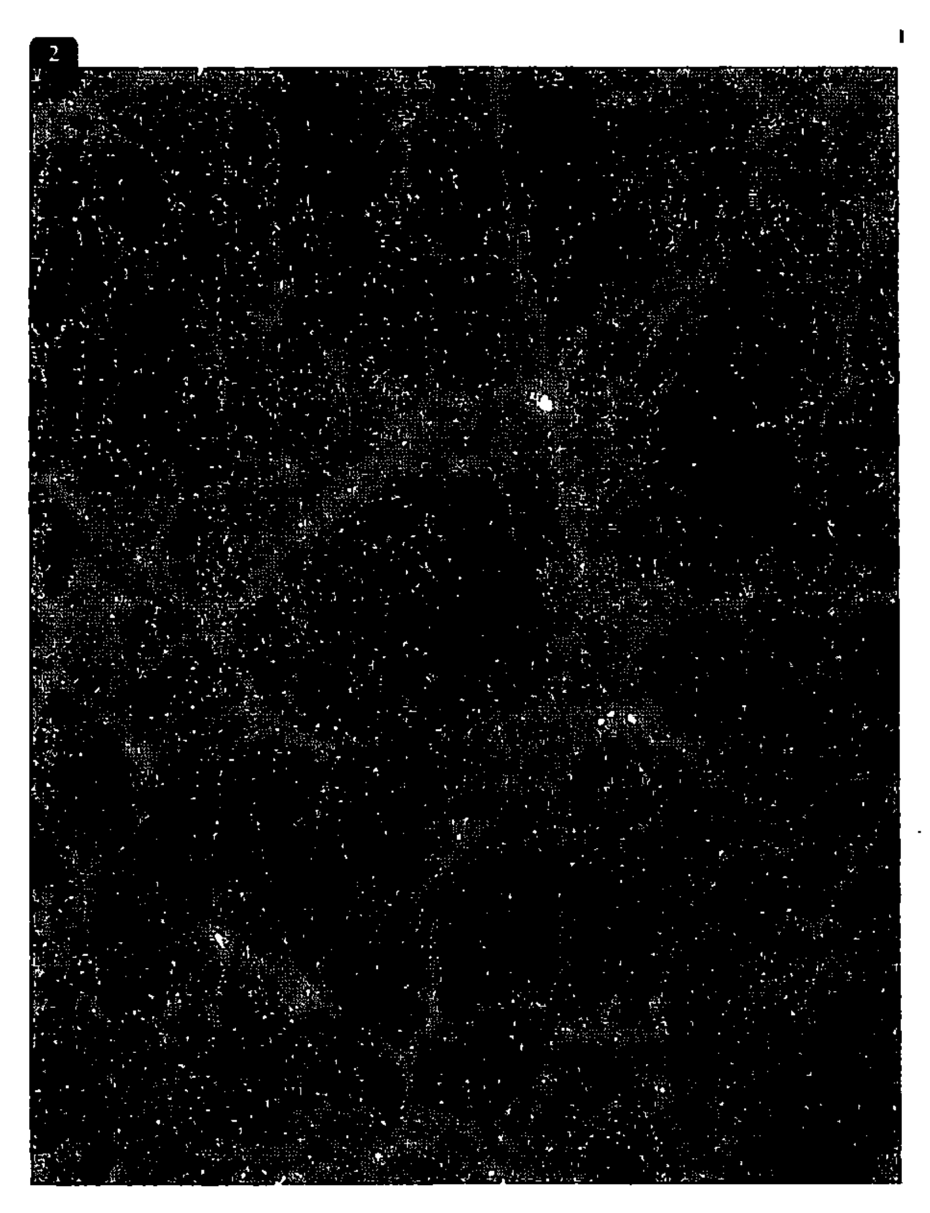
استعان هذا العمل حول المواد الجزيئية بالعديد من المناقشات داخل فريقى، فى مختبرى وفى العديد من المؤسسات التى ترددت عليها ومولتها وزارة التعلــيم القــومى، وCNRS، والاتفاقيــات الأوروبيــة M3D وMolnanomag، وESF (المغناطيسات الجزيئية). وتم تجهيز التجــارب بواســطة ف. فيلــين F. Villain. والمواد المقدمة تمت استعارتها بلطف من العديد من المتعهدين الذين أعترف لهــم بالجميل.

وأقدم هذه المساهمة فى ذكرى عالمين فرنسيين أخذت عنهما الكثير، أوليفييه خان Olivier Kahn المتوفى فى ديــسمبر ١٩٩٩ ولــويس نيــل Louis Neel، الحاصل على نوبل فى الفيزياء ١٩٧٠، الذى أعلم بغيابه.

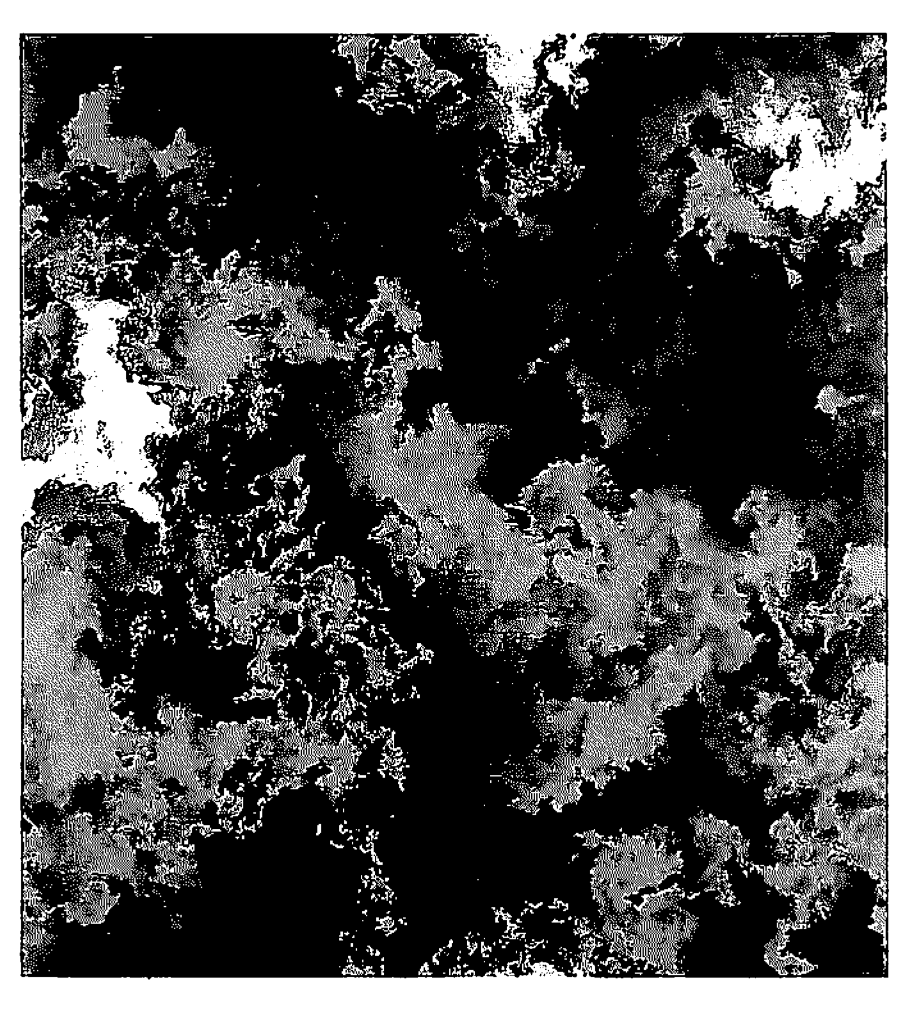
---

(١٥٦) J.-M. Lehn, Chimie supramoleculaire, VCH, New York, 1997.
T. A. Nguyen, J. -M. Lehn, ce volume

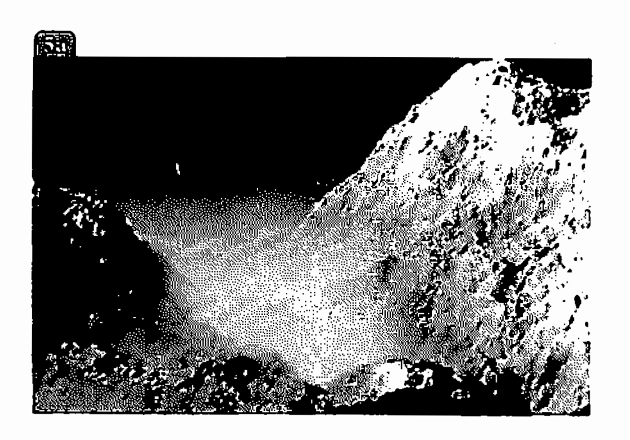
(١٥٧) Dossier: 1999, «Annee internationale de la chimie», Pour la Science, decembre 1999, p. 69-84: J. M. Lehn, J.-P. Launay, T. Ebbesen, G. Ourisson.
«La Science au present», Encyclopredia Universalis, 1998; a) M.W. Hosseini, b) J.-P. Sauvage, c) P. Bernier.

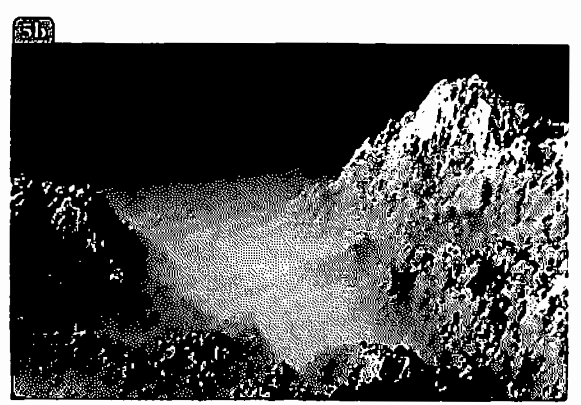


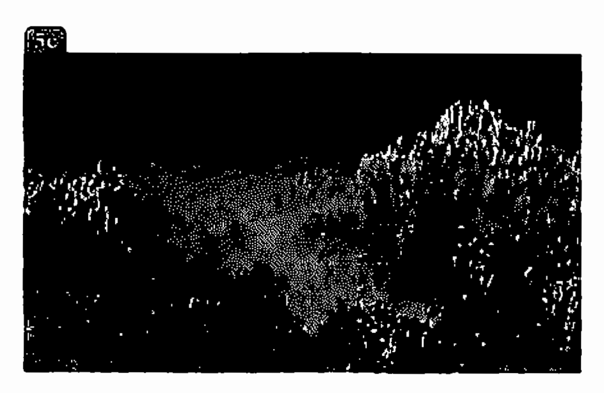
المصادر المحاضرة ١٧٧ الشكل (٢)
ركام مجرات تمت محاكاته بواسطة كولابورسيون
فيرجو Collaboration Vergo في ١٩٩٦.
وهو يتعلق بمحاكاة في الأبعاد الثلاثة تتضمن ٢٥٦ X ٢٥٦ X ٢٥٦ جزئ



المحاضرة ١٧٧ الشكل (٩)
تركيز غير مُوجَّه سلبى (ملوث) ينتقل بواسطة سيلان مضطرب
ثنائى الأبعاد من النوع الذى نجده فى الجو وفى المحيط، تمت محاكاته
رقميًا على شبكة ٢٠٤٨ X ٢٠٤٨ وغير الموجه متقطع وله خصائص
على مستوى "غير قياسى" لا يمكن التنبؤ به بالتحليل المعيارى. والتركيزات الأكثر
ضآلة بالأزرق والأكثر قوة بالأصفر. شكل من سيلانى (.Cilani (A، ونوليه
(.Noullez (A وفيرجاسولا (.Vergassola (M.
مرصد Cote d`Azur, مختبر ٦٥٢٩، G. D. Cassini, UMR
عمليات محاكاة فى IDRIS, CNRS.



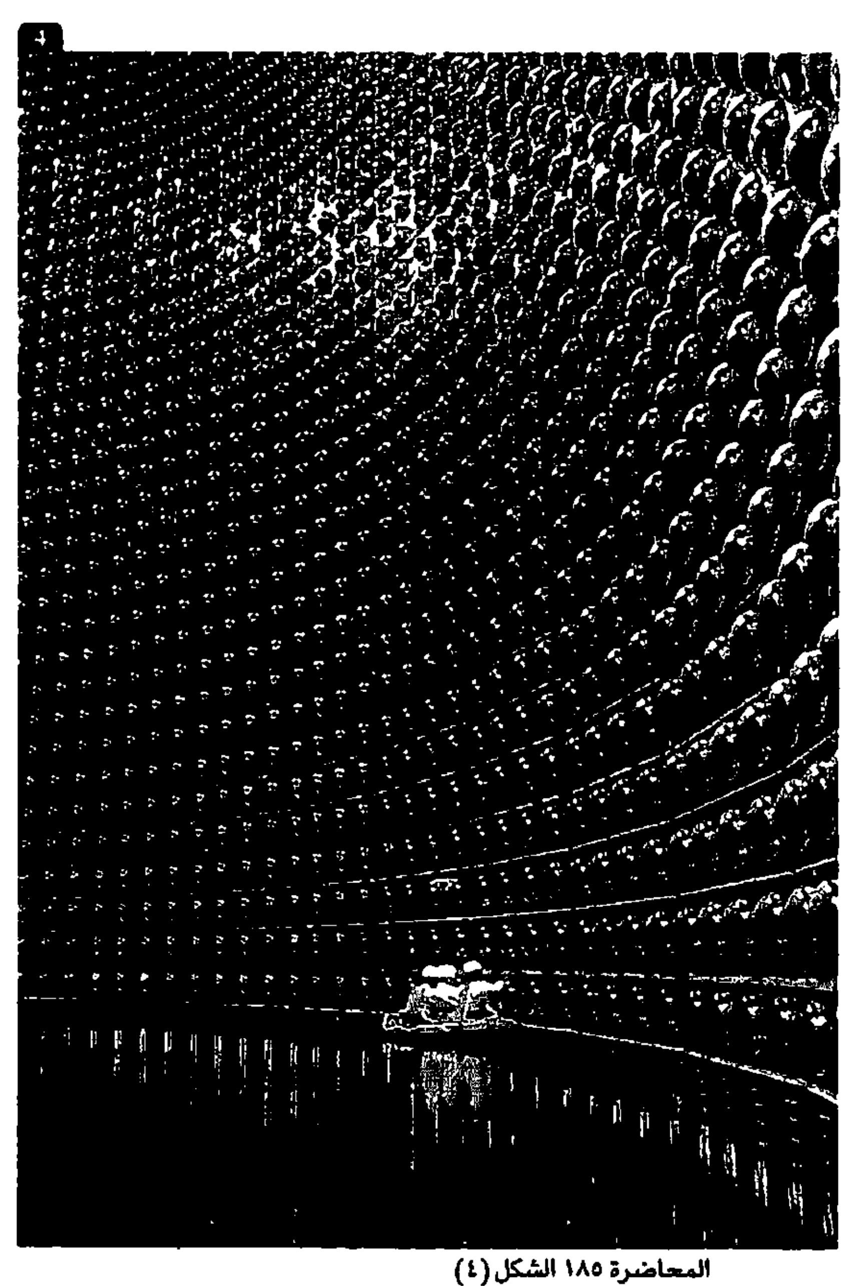




المحاضرة ١٨٠ الشكل (٥)

جبال كسورية fractales ليست فى أى مكان

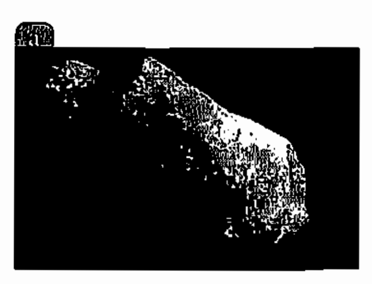
وتقيس الخشونة رقميًا .



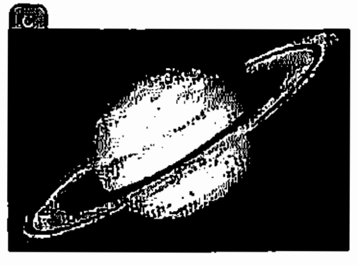
المحاضرة ١٨٥ الشكل (٤)

صورة للكاشف كاميوكاند الفائق super - Kamiokande

خلال مرحلة الحشو (صورة ICRR - Tokyo)



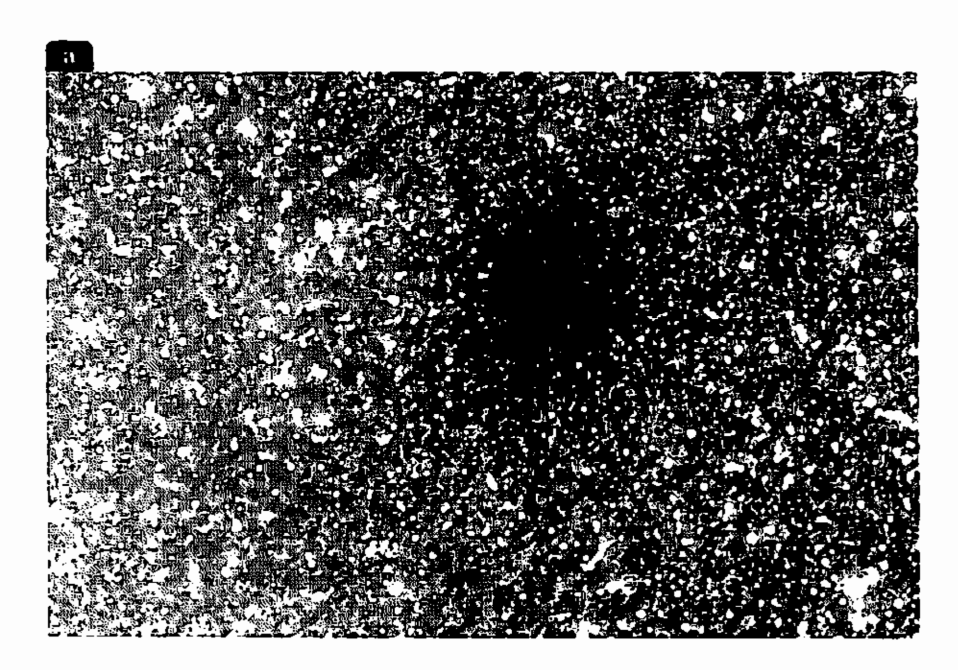


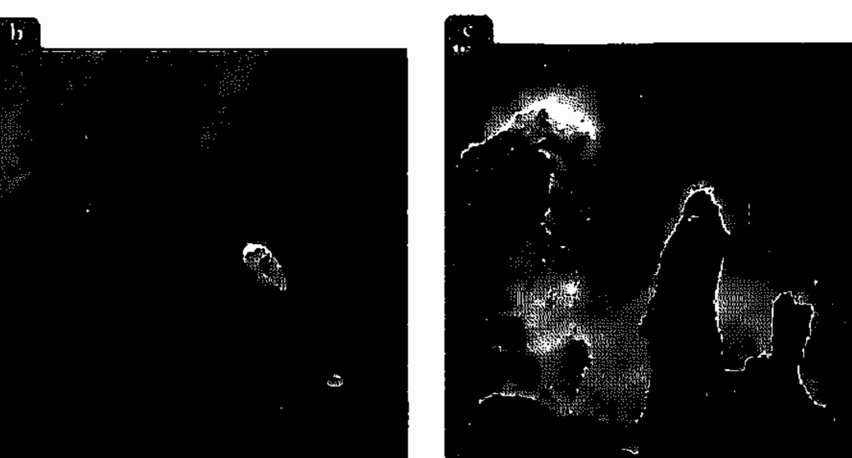


المحاضرة ١٨٩ الأجرام الصغيرة للمجموعة الشمسية هي بقايا تكوين المجموعة (أ)، ويمكن تمييز الكويكب إيدا Ida مصحوبًا بالقمر الصغير، داكتيل Dactyle.
[NASA/JPL - Caltech]

(ب) مذنب يُظهر ذيل عظيم من البلازما (الجزء الأزرق) [Wally Pacholka]

(ج) الكوكب زحل وحلقاته تم تصويره في نوفمبر ١٩٨١ بواسطة المسبار فوياجير ٢ Voyager 2 ويمكن تمييز ثلاثة أقمار وظل أحدهم على الآخر وعلى الكوكب [NASA/JPL - Caltech]

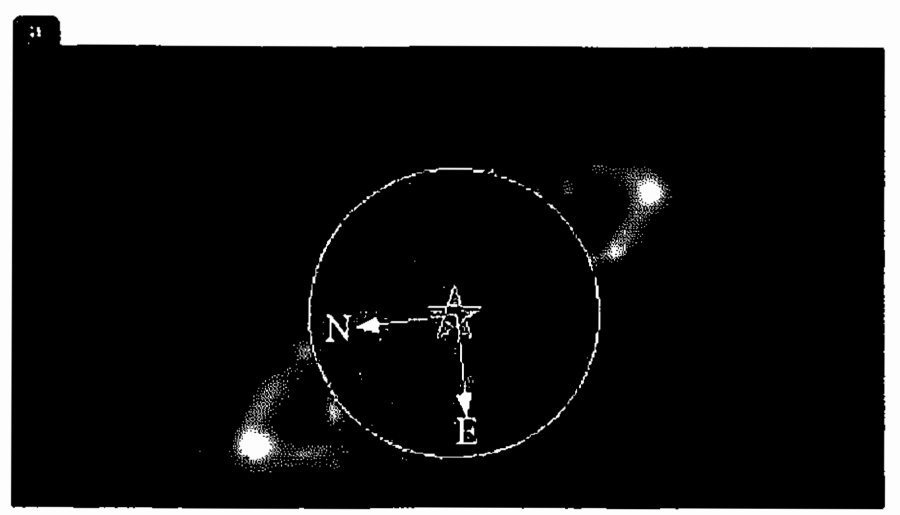


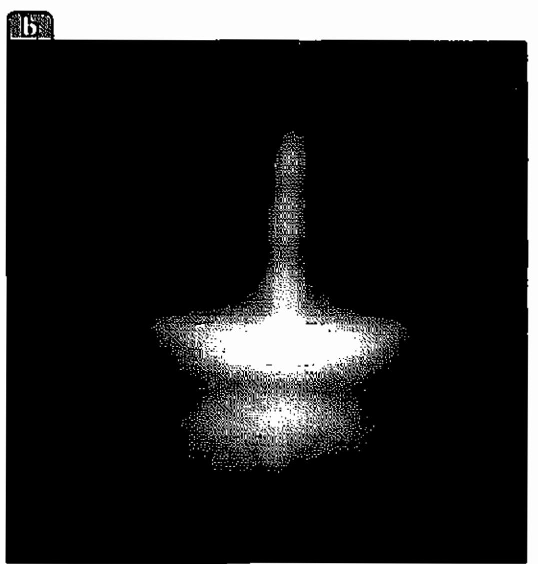


المحاضرة ١٨٩ نجوم تتكون بلا توقف فى بيئة ما بين النجوم، حيث توجد مادة أولية لتصنيعها. (أ) نرى سحابة غبار، تقع عند أقل من ألف سنة ضوئية منا، وتمنع كل الضوء الصادر من النجوم الموجودة خلفها.

(ب) سديم كوكبة العُقاب Aigle مكان توليد النجوم، ويُرى بالضوء المرئى.

(ج) "شرنقة" بحجم مجموعتنا الشمسية، حضانة فعلية، وقرص من الغبار والغاز قد تكون الكواكب على وشك التشكل داخله. [NASA/ST ScI]





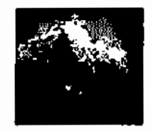
المحاضرة ١٨٩ أقراص ونفاثات مادة يتم ملاحظتها فى البيئة الراهنة للنجوم الحديثة. وهذه الأقراص، الموجودة فى المستوى الاستوائى، تشكل وسطًا ملائمًا لظهور الكواكب. والمستند (أ) يشير إلى حلقة فعلية حول النجم الحديث .HR 4796 A وهذه الحلقة أكبر مرتين من مدار نبتون حول الشمس وذات عرض على الأقل ١٧ وحدة فلكية، وربما يعود استقرارها إلى كواكب لم يتم رصدها بعد. والانهيار الذى يمهد لتكوين نجم يكون مصحوبًا بانفجار مادة على هيئة نفاثات قطبية. (الجزء الأخضر من المستند "ب")
.[NASA]



100 000 ans

Nébuleuse M16 dans l'Aigle





Disque très dense enfoui dans un « cocon »

1 million d'années

Près du Trapèze dans Orion





Disque opaque observé en ombre chinoise

10 millions d'années

HR 4796 A





Les « jupiters » sont achevés

100 millions d'années

Beta Pictoris





Disque de débris, les « terres » sont achevées

1 milliard d'années

Système solaire

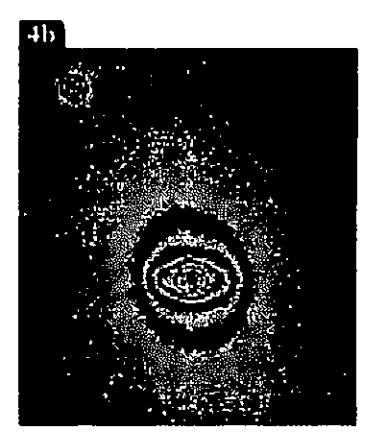




Une étoile et... d'imperceptibles planètes

المحاضرة ١٩٤الشكل (١)



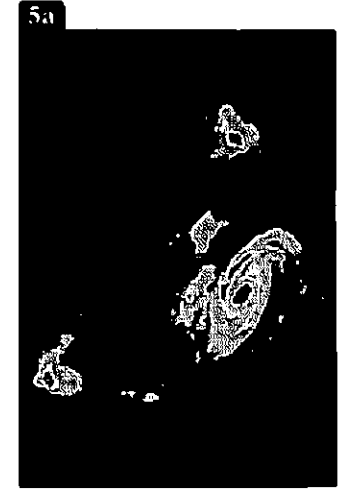


المحاضرة ١٩٥ الشكل (٤ أ، ٤ ب)

يمكن أن يتكون قضيبان متداخلان، مثل الدمى الروسية. وهنا قضيب نووى (إلى اليمين) فى قلب قضيب أولى (إلى اليسار). لاحظ النجم العلوى إلى اليسار من القضيب النووى، الذى يوجد فى الصورتين ويعطى المستوى النسبى.

ويدور القضيب الثانى أسرع من القضيب الأول.

(تبعًا لـ كومبييه Combes وآخرين، ٢٠٠٠)



المحاضرة ١٩٥ الشكل (٥ أ)

خريطة غاز الهيدروجين الذرى HI عند (٢١ سم) تم الحصول عليها بالفلك الراديوى بواسطة مجموعة تلسكوبات VLA (الولايات المتحدة) فى منظومة المجرات المتفاعلة Messier 81 - 82.

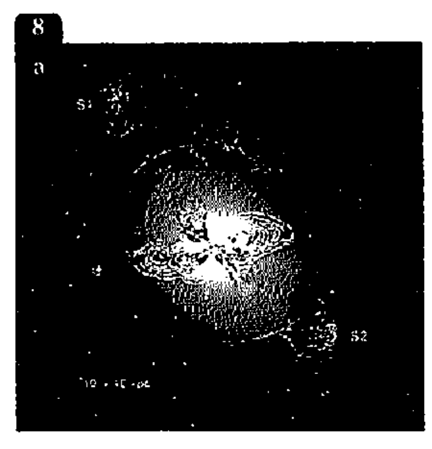
المحاضرة ١٩٥ الشكل (٧ أ)

عجلة العربة (أو دولاب العجلة Cartwheel)

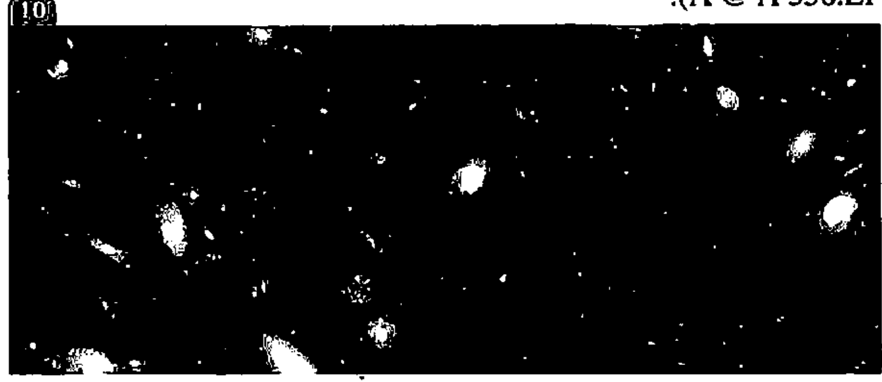
نتيجة التصادم بكل قوة بين مجرتين.

وتنتشر موجة على هيئة حلقة من المركز إلى الحافة، بإطلاق عملية تكوين نجوم جديدة.

وتظهر حلقة جديدة فى المركز (صورة تلسكوب الفضاء هابل Hubble).



المحاضرة ١٩٥ الشكل (٨)
مجرة كوكبات قنطورس أ Centaurus A هي مجرة إهليلجية ذات نواة نشطة. وترى نفاثة بلازما في النطاق الراديوي (وهي هنا بالأزرق). وتكونت حولها بالكامل فواقع من النجوم (تم إظهارها بالأصفر)، بتجمع نجوم مترافقة تم ابتلاعها حديثًا. وفواقع النجوم تحتوي أيضاً على غاز (HI ٢١ سم) الحدود هنا بالأبيض) وعلى غاز جزيئي (يُلاحظ في الدوائر الحمراء).
تبعًا لـ Charmandaris وآخرين (٢٠٠٠ .(A @ A 356.LI



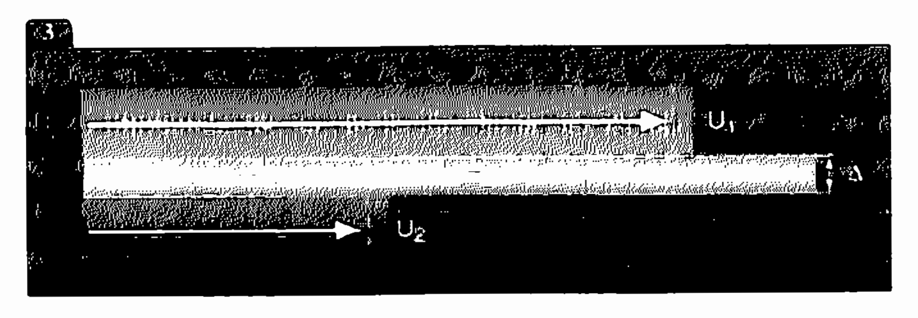
المحاضرة ١٩٥ الشكل (١٠)
صورة للسماء العميقة جداً تم الحصول عليها بواسطة التلسكوب الفضائي هابل Hubble Deep Field North ولاتحتوي المنطقة على نجوم من مجرتنا الخاصة، ولكن على مجرات أكثر أو أقل بعداً. ويتيح ذلك العودة في الزمن ورصد الكون عندما كان عند ٥ في المائة من عمره.



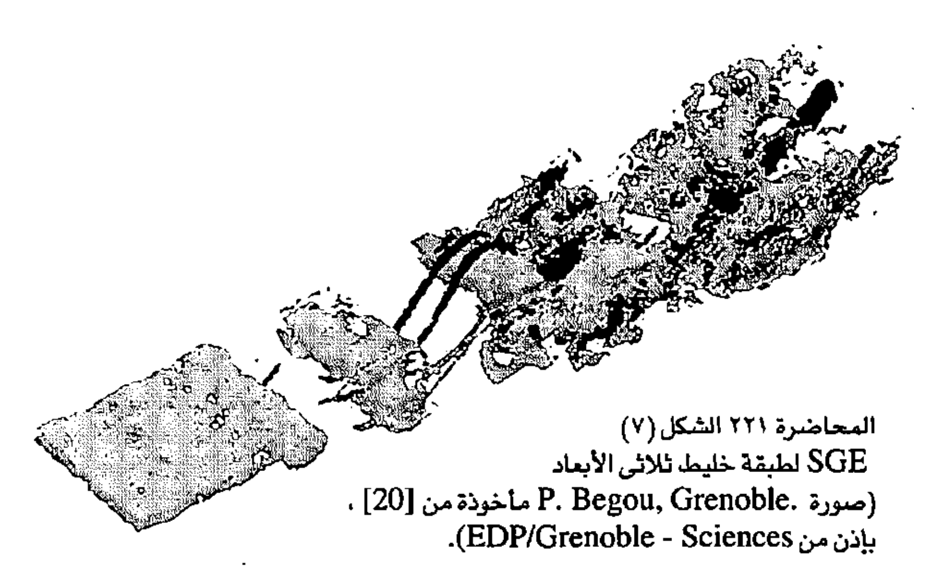
المحاضرة ١٩٦ الشكل (٦)



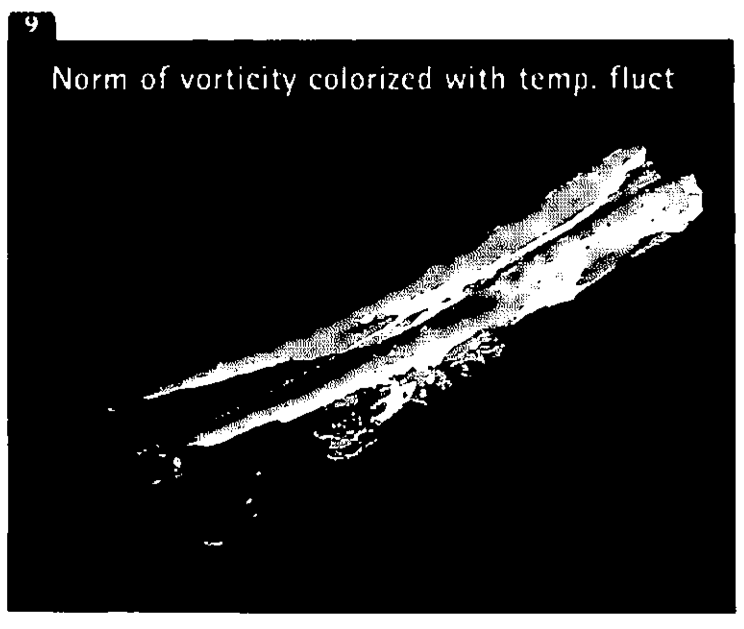
المحاضرة ٢٢١ الشكل (١)
بقعة حمراء للمشترى (صورة تلطفت ناسا بإطلاعنا
عليها NASA, Jet Propulsion Laboratory).



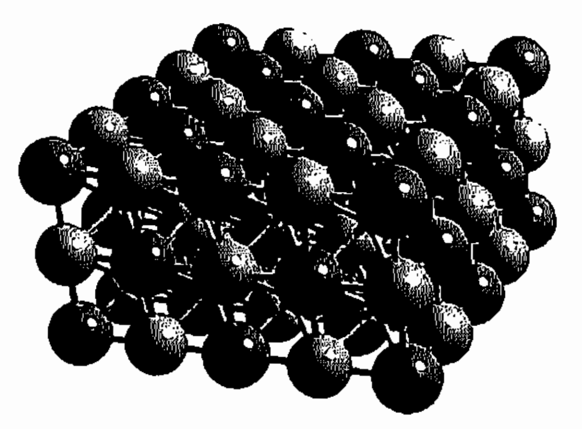
المحاضرة ٢٢١ الشكل (٣)
رسم تخطيطى لطبقة دوامية من 32 .p [4]
(بإذن من EDP/Grenoble - Sciences)



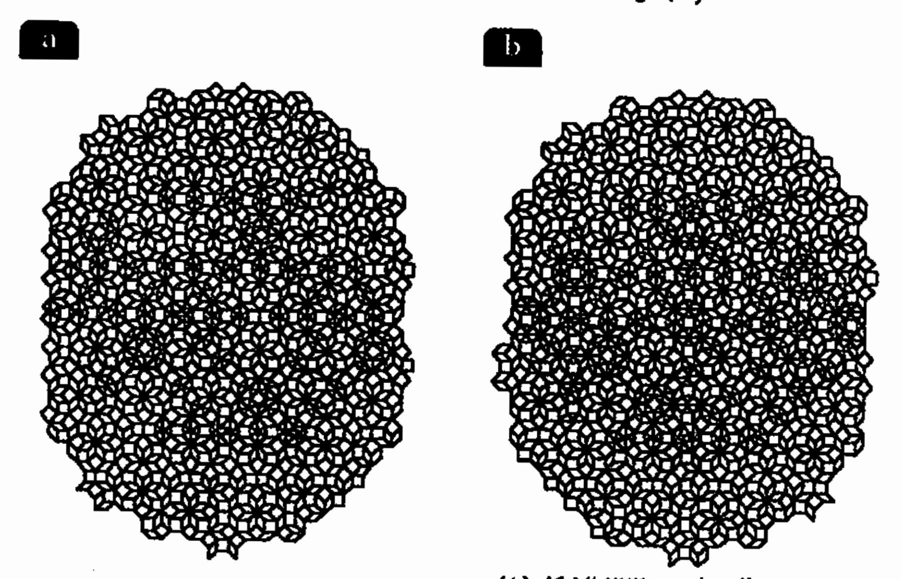
المحاضرة ٢٢١ الشكل (٧)
SGE لطبقة خليط ثلاثى الأبعاد
(صورة .P. Begou, Grenoble ماخوذة من [20] ،
بإذن من EDP/Grenoble - Sciences).



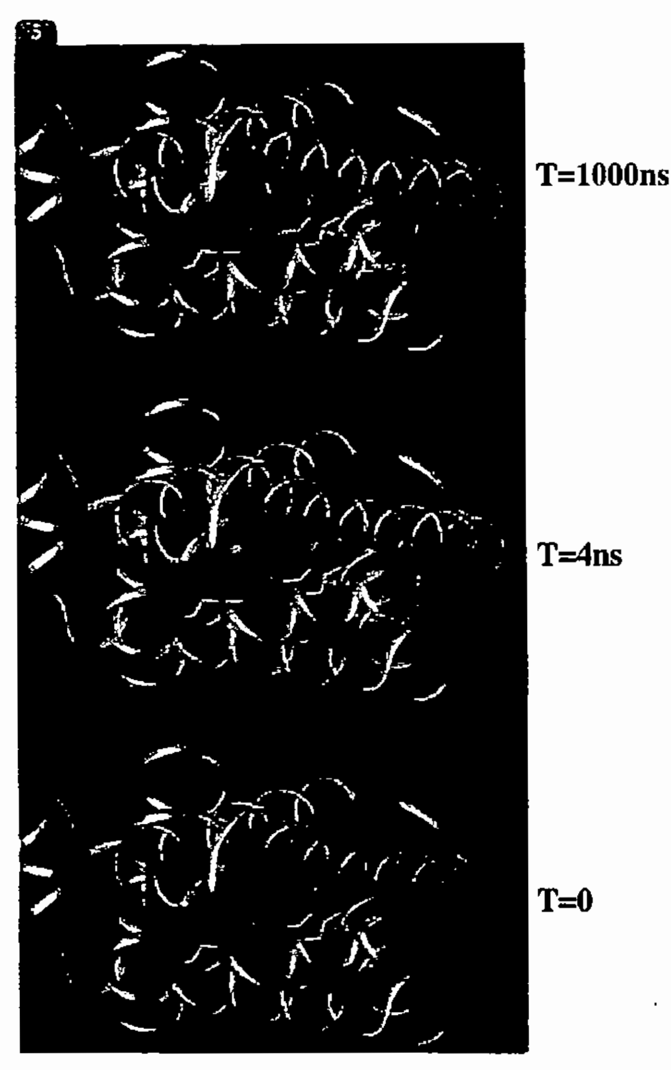
المحاضرة ٢٢١ الشكل (٩)
أعاصير طولية متبادلة على المصراع الخلفي لهرمس Hermes
(صورة .E. David, Grenoble ماخوذة من p. 189 [4] ،
بإذن من EDP/Grenoble - Sciences).



المحاضرة ٢٢٢ الشكل (١)
بلورة تم تجميعها من الذرات دوريًا ثلاثة أضعاف:
هنا أربع حلقات مكعبة على أوجه مركزة لبنية NaCl
(مجموعة Fm3m).



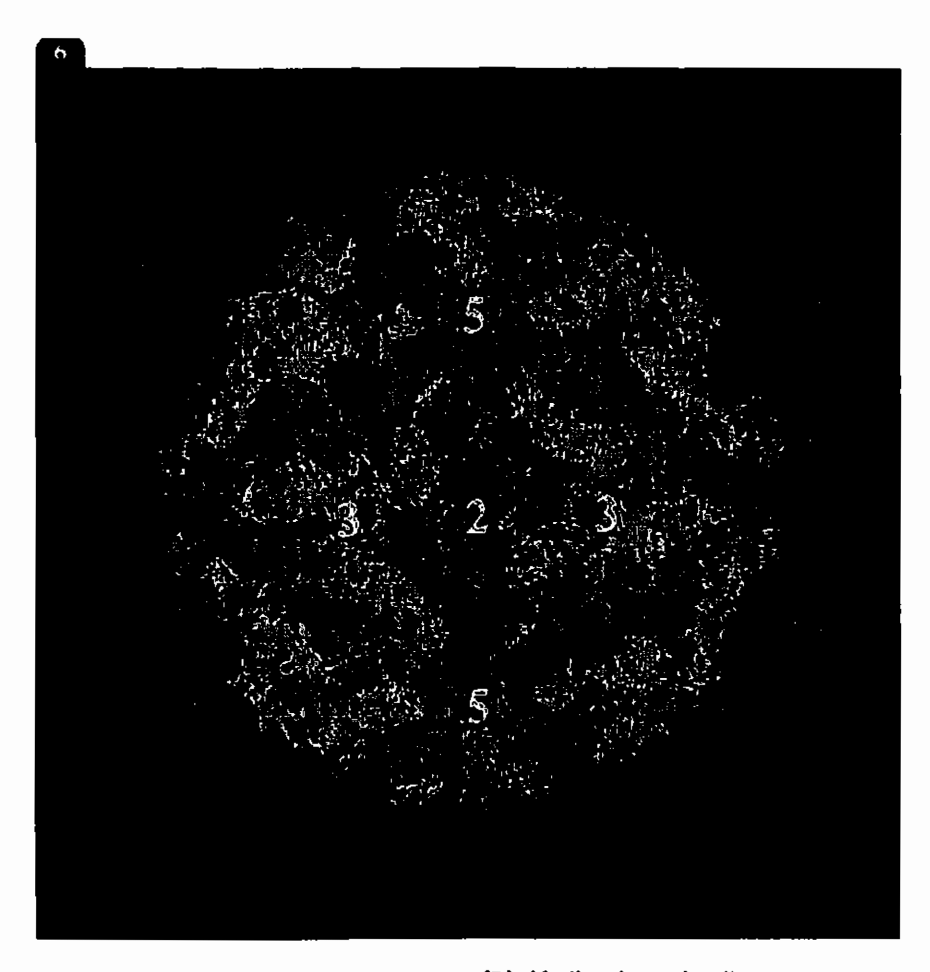
المحاضرة ٢٢٢ الشكل (٨)
تراكب تبليط ثمانى الأضلاع عليه هو نفسه بعد (أ) نقل التبليط، (ب) دوران $2\pi / 8$ حول نقطة تبليط. بعكس حالة البلورات،
لا نحصل على تراكب معقد، ولكن عدد غير محدود من النقاط تصير مع ذلك متطابقة: لا ينقص معدل استرجاع التبليط (المتناسب مع الترابط الذاتى autocorrelation) إلى مالا نهاية، ويكون هذا التبليط منظماً فى المسافة الطويلة وله منظومة تماثل من الدرجة ٨.



المحاضرة ٢٢٩ الشكل (٥)

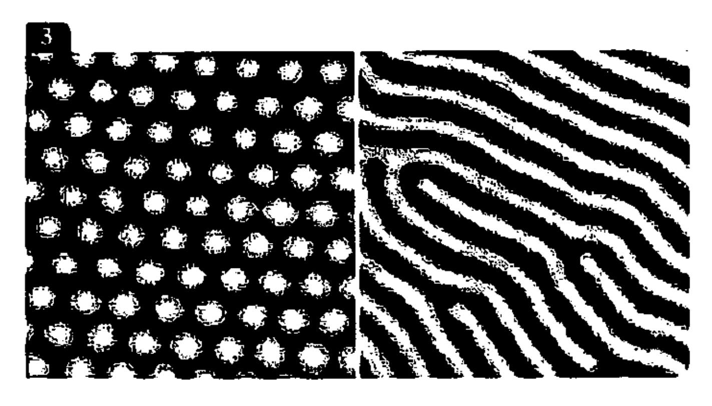
تعديل بنية الميوجلوبين myoglobine خلال تفاعل بيولوجى.

عند لحظة (t = 0 على اليسار) يتم بواسطة الليزر تحطيم الروابط بين الحديد واكسيد الكربون. ذرة الأكسجين بالأخضر، والكربون بالرمادى، وحديد اليحمور heme بالأحمر. وبعد اربع نانوثانية (nsec جزء من مليار من الثانية) (فى الوسط) ينتقل جزء يضمسافة ٤ انجستروم ويرجع °90. وعلى اليمين بعد جزء من مليون من الثانية، يخرج الجزئ يضمن حديد اليحمور [Ref. 7].



المحاضرة ٢٢٩ الشكل (٦)

نواة فيروس بلسان أزرق: القطر يصل إلى ٨٠٠ أنجستروم. [Ref. 8] وتلك هى أيضًا فى الوقت الراهن أكبر بنية لفيروس يتم تحليلها بالأشعة السينية.



المحاضرة ٢٣٧ الشكل (٣)

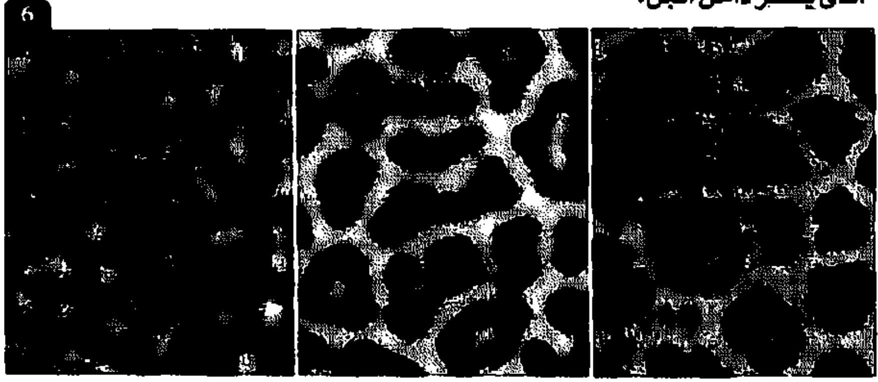
تصميمات كيميائية مستقرة، تسمى تورينج Turing، يتم رصدها فى المفاعل المكانى المفتوح، وتتكون من قرص جل من بوليمرات الجلوكوز agarose، وعندما تتم تغذيته باستمرار بمحاليل كلوريت ويودور البوتاسيوم وحمض أبيض مستخلص من حمض التفاح malonique فى وجود نشاء، يتلون مؤشر قياس اليود.

ويتم حمل المتفاعلات بشكل منتظم على سطح القرص.

وتصميمات البقع التى تشكل شبكة سداسية أو على هيئة خطوط متوازية تنتشر تلقائياً متجاوزة بعض القيم الحرجة لتركيز المتفاعلات فى محاليل التغذية.

ويعتمد انتقاء تصميم ما أيضاً على متغير التحكم هذا.

وتفسر تغيرات الألوان من الأصفر إلى الأزرق التعديلات التلقائية لتركيز أيونات اليودور الذى ينتشر داخل الجل.



المحاضرة ٢٣٧ الشكل (٦)

تشابه بيولوجى: تصميم كيميائى معقد يمكن أن يحاكى التصميم الذى تتم ملاحظته على فراء النمر عند إجراء التفاعل CIMA فى مفاعل مكانى مفتوح.

والصورة على اليسار هى نتيجة إجمالية لتجربة كيميائية، وتناظر الصورة فى الوسط تلوين رصد تجريبى، والصورة على اليمين تناظر ظهر نمر.

المؤلفون

أندريه أميليس: أستاذ بجامعة بواتييه، ورئيس قسم الكيمياء بالمعهد الجامعى للتكنولوجيا ببواتييه.

آلان أسبى: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمي CNRS (مختبر شارل فابري بمعهد البصريات بأورسيه)، وأستاذ بمدرسة البوليتكنيك Polytechnique.

جون أودوز: مدير أبحاث بالمركز القومي للبحث العلمي CNRS، ومدير قصر لاديكوفرت.

روجيه باليان: مستشار علمي بوكالة الطاقة الذرية CEA، وعضو بأكاديمية العلوم.

سبستيان باليبار: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS، وعضو بمختبر الفيزياء الإحصائي بالمدرسة العليا للآداب والعلوم بباريس.

إيفا باير: مديرة أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS (بيزونسون).

فيليب بيان: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS، وأستاذ مساعد بمدرسة البوليتكنيك Polytechnique

جون-بيير بيرينج: أستاذ الفيزياء بجامعة باريس-سود (المركز العلمى بأورسيه)، وعالم فى معهد فيزياء النجوم الفضائية IAS بأورسيه.

ميشيل بليه: مدير مساعد مسؤول عن الأبحاث بالمدرسة العليا للآداب ENS بمدينة ليون، فونتنيه/سان كلو سابقًا.

جون بيير بورجينيون: مدير بمعهد الدراسات العليا العلمية IHES.

أندريه براهيك: أستاذ فى فيزياء النجوم بجامعة باريس ٧ دوني-ديدرو، ومدير الفريق الجامعى لجاذبية جاما بوكالة الطاقة الذرية بمدينة ساكلى.

إدوار بريزان: أستاذ الفيزياء بجامعة بيير ومارى كورى.

ميشيل كامبيللو: أستاذ بجامعة جوزيف-فورييه بمدينة جرونوبل، ومدير مختبر الجيوفيزيائية الداخلية والفيزيائية البنائية.

ميشيل كاسيه: عالم فى فيزياء النجوم بوكالة الطاقة الذرية، وبمعهد فيزياء النجوم بباريس.

باتريك شاكان: أستاذ بجامعة بيير ومارى كورى باريس ٦.

كلود كوهين-تنودجي: أستاذ بالكوليج دو فرانس (حاصل على كرسى الأستاذية فى الفيزياء الذرية والجزيئية)، وحاصل على جائزة نوبل فى الفيزياء عام ١٩٩٧.

فرانسواز كومب: عالمة فلكية بمرصد باريس.

آلان كون: أستاذ بالكوليج دو فرانس (حاصل على كرسى الأستاذية فى التحليل وعلم الهندسة).

تيبو دمور: أستاذ بمعهد الدراسات العليا العلمية IHES.

ستانيسلاس ديهاآن: مدير أبحاث بالمعهد القومى للصحة والبحث الطبى INSERM.

باتريك دو كيبير: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS.

إيفار إيكيلاند: أستاذ فى علوم الرياضة بجامعة باريس ٩-دوفين.

هوبير فلوكار: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS.

أورييل فريش: مدير أبحاث بالمركز القومي للبحث العلمى CNRS، وعضو مراسل بأكاديمية العلوم.

إليزابث جيباكوبينو: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS، ومدير مختبر كاستلر بروسل (ENS-باريس ٦).

جون-إيف جيرار: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS (معهد علوم الرياضات بمارسيليا-لومينى).

هنرى جودفرين: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS، ورئيس اللجنة الخاصة بالحراريات المنخفضة بالاتحاد الدولى للفيزياء البحتة والتطبيقية.

دونى جراتياس: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS، وأستاذ بكلية العلوم التقنية والمدرسة الوطنية العليا للكيمياء بباريس.

إتيان جويون: مدير بالمدرسة العليا للآداب والعلوم بشارع أولم، باريس.

سيرج هاروش: أستاذ الفيزياء بجامعة بيير ومارى كورى باريس ٦، أستاذ بالمدرسة العليا للآداب والعلوم، باريس.

إيف هيليجوارخ: أستاذ فى علوم الرياضة بجامعة كآن Caen.

كلود جوبار: أستاذ بجامعة دوني-ديدرو باريس ٧، مدير معهد فيزياء الكرة الأرضية بباريس.

تيرى جوتو: أستاذ بمعهد البحار الجامعى الأوروبى (جامعة بروتانى الغربية).

جون-بيير كاهان: أستاذ متقاعد بجامعة باريس-سود، وعضو بأكاديمية العلوم.

إيتيان كلاين: مساعد مدير علوم المادة بوكالة الطاقة الذرية، وأستاذ بالمدرسة المركزية Centrale بباريس.

مارك لاشياز-رى: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS.

جون-مارى لهن: أستاذ بالكوليج دو فرانس (حاصل على كرسى الأستاذية فى الكيمياء والتفاعلات الجزيئية)، مدير مختبر الكيمياء الجزيئية الفوقية بجامعة لويس-باستير بستراسبورج، حاصل على جائزة نوبل فى الكيمياء عام ١٩٨٧.

جون-لويس لو مووال: مدير قسم الجيولوجيا المغناطيسية géomagnétisme، بمعهد فيزياء الكرة الأرضية بباريس ، مدير المراصد المغناطيسية.

زافييه لو بيشون: أستاذ بالكوليج دو فرانس (حاصل على كرسى الأستاذية فى ديناميك الجيولوجيا géodynamique)، ومدير مختبر الجيولوجيا بالمدرسة العليا للآداب والعلوم بشارع أولم بباريس.

كريستيان لو بروفو: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS، ومدير مختبر الدراسات géophysique الجيوفيزيائية وعلم المحيطات الفضائى بتولوز.

مارسيل لوسيور: أستاذ بالمعهد القومى للعلوم التقنية بجرونوبل.

هيرفيه لو تــروت: مدير أبحاث بمختبر الأرصاد الآلية (المركز القــومى للبحــث العلمي/المدرسة العليا للعلوم والآداب/كلية العلوم التقنيــة/جامعــة باريس ٦).

جون-مارك ليفي-لوبلون: أستاذ الفيزياء بجامعة نيس.

جاك لووينز: المدير العلمى بالمدرسة العليا للفيزياء والكيميــاء الـصناعية ببلديــة باريس وهو أستاذ بذات المدرسة.

بيير-لويس ليون: أستاذ بجامعة باريس ٩ دوفين.

جون-بيير لومينيه: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS، وعــالم فى فيزياء النجوم بمرصد ميدون.

جون-بول مالريو: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS.

بينوا ماندلبرو: أستاذ فى علوم الرياضيات بجامعة يــال، وحاصــل علــى لقــب الزمالة متقاعد بمركز IBM T.J. Watson للأبحاث.

جيلان دو مارسيلى: أستاذ فى الجيولوجيا التطبيقية بجامعــة بــاريس ٦، ومــدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS.

جون-لويس مارتان: أستاذ بكلية العلوم التقنية ومدير أبحــاث بالمعهــد القــومى للصحة والبحث الطبى INSERM.

فيليب ماسون: أستاذ فى الجيولوجيا الكوكبية وعلم الكواكب بجامعة باريس-ســود (أورسيه).

إيف مبير: أستاذ بجامعة باريس-دوفين باريس ٩.

كريستيان مينو: أستاذ بمختبر الكيمياء النظرية بجامعة بيير ومارى كورى باريس ٦.

جون-فرانسوا مينستر: رئيس-مدير عام بالمعهد الفرنــسى للأبحــاث الخاصــة باستثمار البحار IFREMER.

أندريه نوفو: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS.

نجويان ترونج آنه: مدير أبحاث بالمركز القومي للبحث العلمي CNRS، وأستاذ بمدرسة البوليتكنيك

إيف بيتروف: مدير عام بالـ ESRF (European Synchroton Radiation Facility) تسريع السنكروترون الإشعاعي الأوروبي بجرونوبل.

جووال بيكو: مدير أبحاث بمعهد البحث والتنمية IRD.

ميشيل بيكوش: أستاذ بجامعة نانسي ١.

ماري-بول بيلينى: أستاذة بجامعة بيير وماري كوري باريس ٦، وعضو بمعهد فرنسا الجامعي.

جيم ريتر: أستاذ مساعد بقسم علوم الرياضة بجامعة باريس ٨.

ديميترى روديتشاف: مسئول عن الأبحاث بالمركز القومي للبحث العلمي CNRS (مجموعة فيزياء الأجسام الجامدة).

ديفيد روول: أستاذ الفيزياء النظرية بمعهد الدراسات العليا العلمية IHES.

روبير سادورنى: مدير أبحاث متقاعد بالمركز القومي للبحث العلمي CNRS.

أوليفييه تالاجران: مدير أبحاث بالمركز القومي للبحث العلمي CNRS.

كاترين تيبو: مدير أبحاث بالمركز القومي للبحث العلمي CNRS (مركز القياسات الطيفية النووية والقياسات الطيفية للكتل).

جاك تيتس: أستاذ بالكوليج دو فرانس (حاصل على كرسي الأستاذية في نظرية المجموعات).

دانيال تراى: باحث في فيزياء الجسيمات بالمركز الأوروبي للبحث الذري CERN.

فرانسوا فانوتشى: أستاذ الفيزياء بجامعة باريس ٧، دونى ديدرو.

سيلفى فوكلير: أستاذ بجامعة بول ساباتييه (تولوز ٣).

ميشيل فيرداجيه: أستاذ بجامعة بيير وماري كوري باريس ٦، ومدير مختبر الكيمياء الغير عضوية والمواد الجزيئية.

ألفريد فيدال-مدجار: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS (معهد علوم فيزياء النجوم بباريس).

لوران فيجرو: مدير قسم فيزياء النجوم بوكالة الطاقة الذرية - ساكلى.

كلود فايسباخ: مدير أبحاث بالمركز القومى للبحث العلمى CNRS.

التصـــحيح اللغوى : آمال الديب
صفاء فتحي
عبد الوهاب الصاوى
الإشـــــراف الفنى : حسن كامل



ما الكون ؟

جامعة كل المعارف

إشراف : إيف ميشو

الجزء الرابع

ما أحوجنا ونحن فى مستهل القرن الحادى والعشرين إلى اكتساب المعرفة العلمية ؛ سواء فى مجال الإنسانيات أو فى مجال العلوم الطبيعية . فالمعرفة العلمية لا يجب أن تقتصر على العلماء والمتخصصين ، بل ينبغى أن يتسع نطاقها ليشمل كل فرد فى مجتمعاتنا العربية . وإذا كان على العلماء التعمق كل فى تخصصه ، ينبغى أن تنشر المعارف العلمية العامة - دون تبسيطها على نحو مُخل - بحيث تصبح أداة منهاجية تقود خطانا نحو المستقبل المأمول .

وفى هذا السياق ، وعلى ضوء أهداف المشروع القومى للترجمة التى تتمثل أساسًا فى تحقيق التوازن بين المعارف الإنسانية فى المجالات العلمية والفنية والإبداعية ، فضلاً عن بناء ودعم الجسور الثقافية بين مصر والعالم ، تأتى ترجمة موسوعة "جامعة كل المعارف" فى إطار التعاون مع قسم الترجمة بالمركز الفرنسى للثقافة والتعاون فى مصر .

جابر عصفور

تصميم الغلاف : فيليب أبلوا

